ISBN 978-5-8166-0464-2
ББК 34

Научное периодическое издание по материалам
XVI Всероссийской научно-технической конференции
с международным участием

Механики XXI веку

№ 16 2017 г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Янюшкин А.С. **- председатель совета**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск
Огар П.М. **-** доктор технических наук, профессор кафедры «Машиноведение, механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;
Рыков С.П. **-** доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;
Ефремов И.М. **–** кандидат технических наук, зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Янюшкин А.С. **-** профессор, доктор техн. наук, ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лобанов Д.В. **-** профессор, доктор техн. наук, ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск
Скиба В.Ю. **-** доцент, кандидат техн. наук, ФГБОУ ВО «НГТУ», г. Новосибирск
Архипов П.В. **-** доцент, кандидат техн. наук, ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

Издается с 2004 года. Периодичность 1 номер в год

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке eLIBRARY>RU

Перепечатка материалов из журнала «Механики XXI веку» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

Адрес редакции: 665709, Российская Федерация, Иркутская область, г. Братск,
ул. Макаренко, 40, Механический факультет,
кафедра «Технология машиностроения», тел: 8(3953)325397
e-mail: mechanics@brstu.ru Сайт: http://www.brstu.ru

Братск 2017

XVI Всероссийская с международным участием
научно-техническая конференция
«МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ»

XVI Russian national with international participation
scientific and technical conference
"MECHANICAL ENGINEERS TO XXI CENTURY"

17…18 Мая/May 2017 г.

ОРГАНИЗАТОР КОНФЕРЕНЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», г. Братск, Россия

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

Современные технологии и автоматизация в машиностроении;
Материаловедение, динамика и прочность машин и механизмов;
Конструкции, технические и эксплуатационные свойства транспортных средств;
Эксплуатация и ремонт машин и оборудования.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Янюшкин А.С. **- председатель конференции**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Технология машиностроения» БрГУ; ***Огар П.М.*** **-** д.т.н., профессор кафедры «Машиноведение, механика и инженерная графика» БрГУ; ***Рыков С.П.*** **-** д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автомобильный транспорт» БрГУ; ***Ефремов И.М.*** **–** к.т.н., зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» БрГУ.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Лобанов Д.В. - д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» БрГУ; ***Попов В.Ю.*** **-** к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» БрГУ; ***Архипов П.В.*** - к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» БрГУ; ***Рычков Д.А.*** **-** к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» БрГУ.

© Авторы публикаций, 2017
© ФГБОУ ВО «БрГУ», 2017

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Гордон Меер Борисович (1917 – 1989)

Доктор технических наук, профессор.
Заслуженный деятель науки ЧАССР.

Основатель научного направления «Повышение производительности и качества механообработки на базе применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и прогрессивных методов затачивания режущих инструментов».

Основатель кафедры «Технология машиностроения» в Чувашском государственном университете им. И.Н. Ульянова и ее первый заведующий с 1968 – 1986 годы.

ГОРДОН Меер Борисович родился 18 мая 1917 года, с. Юровичи, ныне Полесской области. Республика Беларусь. Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Чувашской АССР. Умер 27 августа 1989 года, г. Чебоксары.

В 1968 году приглашен в Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, организовал кафедру «Технология машиностроения», стал её первым заведующим с 1968 – 1986 годы. Далее, после выхода на пенсию и до конца жизни не прерывал связь с кафедрой и своими учениками: работал профессором-консультантом, руководил аспирантурой, редактировал сборники научных работ.

Расцвет научной деятельности М.Б. Гордона пришёлся на вторую половину прошлого века. Целый ряд открытий был получен с его участием. Это, прежде всего, создание нового класса синтетических и полусинтетических СОЖ - СУВАР (названных в честь древнего чувашского народа), техники и технологии использования СОЖ в распыленном состоянии, теории и практики исследования контактных процессов при резании, шлифовании и затачивании. Под его научной редакцией в г. Чебоксары вышли в свет серии научных межвузовских сборников: "Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов", "Повышение качества смазочно-охлаждающих жидкостей и режущих инструментов", "Теоретические и практические аспекты теории контактных взаимодействий при резании металлов".

Автор свыше 130 научных работ и 22 авторских свидетельств. Подготовил более 10 кандидатов технических наук, трое из которых впоследствии стали докторами технических наук.

Воспоминания, посвящаются памяти М.Б. Гордона, становлению и развитию кафедры "Технология машиностроения" в ЧГУ им. И.Н. Ульянова

Янюшкин А.С.

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
Yanyushkin@brstu.ru

Ключевые слова: основание кафедры, научная школа, история развития, направления исследований, результаты, эпизоды жизни, публикации, перспектива

В статье представлена информация о жизни и деятельности видного ученого, профессора М.Б. Гордона. Отмечены отдельные этапы его жизненного пути, основания и развития кафедры "Технология машиностроения" в ЧГУ им. И.Н.Ульянова. Отмечены научные направления исследований, разработанные М.Б. Гордоном. Отражена практическая значимость выполненных исследований для науки и производства. Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания металлов и механообработки, технологии создания нового класса синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), техники применения СОЖ в распыленном состоянии, разработке способов и устройств управления процессом комбинированной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, гарантирующих высокое качество изделий. Теории и практики исследования микроконтактных процессов при резании, шлифовании и затачивании, открытиях М.Б.Гордона, сделанных во второй половине прошлого века. Отзывы и оценка трудовой деятельности его учеников.

В 1968 году в 16-летнем возрасте я окончил школу. Поскольку в нашей семье 5 детей, а я старший, то мне было легко определиться по жизни. Вывод напрашивался сам по себе: нужно работать. Но хотелось и учиться! В том году на базе машиностроительного факультета ЧГУ им. И.Н.Ульянова была создана кафедра технологии машиностроения, организатором которой и её первым заведующим стал М.Б. Гордон, приглашённый из г. Иванова. Первым ректором ЧГУ им. И.Н. Ульянова был М.Ф. Сайкин. У М.Б. Гордона и С.Ф. Сайкина сложились хорошие отношения, и это являлось, хорошим залогом для развития кафедры [1, 2, 3].

В этом же 1968 году я начал трудовую деятельность в качестве ученика токаря на Химпроме, находящимся рядом со строящимся молодым Новочебоксарском, городом спутником. Одновременно, в числе первого набора на машиностроительном факультете, избрал только что открытую специальность 0501- «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» по вечерней форме обучения. Так началась моя взрослая жизнь: к 7-00 - на работу, после неё, к 18-00 - на учебу. В то время добираться из Новочебоксарска до Чебоксар, тем более в северо-западный район (СЗР), было не так просто. С Химпрома троллейбусом нужно было добраться до Новочебоксарска, умудриться «втиснуться» на 101-й маршрут автобуса, который ходил только до "Энергозапчасти" (конечная остановка), далее пересаживаться снова на троллейбус до машиностроительного факультета (остановка либо "Афанасьева» или «Студгородок"). Надо сказать, что занятий я не пропускал никогда, на первых курсах они проходили в основном в главном корпусе и корпусе химфака. Со 2-го курса, в мае, не успев сдать весеннюю сессию, меня призывают в Советскую армию. Хотя отец всегда говорил, что «за вас за всех уже армию отслужил (отец, Сергей Ильич, в 1942-м в 16-лет попал на фронт, а после Победы такие ребята, как он, оставшиеся в живых, служили срочную службу четыре года - поэтому домой он вернулся только в 1950 году, а в 1951году, в аккурат в его день рождения, родился и я).

Отслужив положенный срок, я вернулся домой, в мае 1972 года, восстановился на 2-й курс и начал работу на прежнем месте. По сути, приходилось работать и токарем, и фрезеровщиком, и шлифовщиком, и даже стропальщиком. Желая наверстать упущенное время, я решил самостоятельно (не официально) учиться на 3-м курсе, одновременно досдавая долги за 2-й курс.

В 1972 году, мне посчастливилось, впервые встретиться с моим будущим учителем, наставником, другом. В числе других дисциплин, мне нужно было досдавать, "Взаимозаменяемость". Помню, что я достойно отвечал на все вопросы Меера Борисовича, и он собирался поставить либо 4 или 5, как вдруг, уже держа зачётку в руках, спросил про единицу допуска. Простейший вопрос, но я растерялся, и он мне вкатил в зачётку плохую оценку. В последствии, на одном из собраний, когда я был уже кандидат технических наук, он утверждал, что мне было учиться легко, и я был, чуть ли не отлични-

ком, но был удивлен, когда я напомнил, что у меня была и тройка. М.Б. Гордон тогда спросил: "А кто это тебе смог поставить тройку? Хотелось бы посмотреть на этого человека". Я ответил, что это был он. Учитель возмущался, говорил, что не может быть – под общее одобрение присутствующих. Но я пока не об этом.

Итак, я закрыл 2-й курс, а на 3-м (или 4-м курсе, уточню по учебному плану, т.к. они у меня все сохранены для будущего анализа системы образования в нашей стране), дошла очередь сдавать "Теорию резания металлов". Этот предмет я любил, тем более, работая токарем, я понимал, как связана теория резания металлов с практикой, при этом зная многие законы резания и практики получения качества обработанной поверхности. Короче, я решил блеснуть перед М.Б. Гордоном своими познаниями. Да ещё и немного схитрить, чтобы «удивить» его наверняка. Тогда, возможно, я уже знал, что Меер Борисович являлся учеником М.И. Клушина. А теперь внимание! Мы все знаем кривую износа (и это необязательно только в резании металлов) – любая кривая износа может характеризоваться участком "приработки- нормального- и катастрофического" износа. Так вот, М.И. Клушиным было замечено, что перед катастрофическим износом падают силы, температура, пластическая деформация. По сути это правильно, идёт разрушение режущей кромки резца, виртуально он становится как бы острее. Это явление никем в книгах не описано. Вот об этом мы и поговорили с моим учителем. В итоге он был восхищён моими знаниями, и тут же пригласил работать на кафедре. Одно он только не брал во внимание. На заводе я получал зарплату в 2 раза больше, чем мне могли предложить в университете. Это я сейчас понимаю его и не понимаю молодых способных студентов: как можно отказываться от того, что тебе предлагают учиться дальше, ещё многое узнать в жизни, и не только в науке. Но это уже философия, а я практик-экспериментатор и выводы делаю только после проверенного эксперимента. Таким образом, после, недолгих сомнений, совета с родителями и своей семьей, переводом с завода, в 1974 году перешёл на кафедру "Технология машиностроения" ЧГУ им. И.Н. Ульянова, на должность техника-механика с окладом 80 рублей в месяц. А ведь была семья, в этом же году родился первый сын Рома.

С первых же дней на кафедре я встал к шлифовальному станку, приспособленному для экспериментов резания единичным зерном. Эксперименты продолжались с утра и до позднего вечера. Ведь мне уже некуда было спешить после работы, я только поднимался на занятия в аудиторию из подвала химкорпуса, где изначально стояло наше оборудование (старые металлорежущие станки, за которыми тщательно следили, убирали, а стояли они в сыром помещении подвала, до которого толком не доходил дневной свет, но это почему-то никого не смущало, главное ведь – эксперимент). Я только потом узнал, что это крайне необходимо для науки и оформления диссертации Н.Р. Лосевой, которая работала практически со дня основания нашей кафедры. А затем эти эксперименты продолжались на алмазных и эльборовых кругах, в том числе и на металлических связках, уже во вновь созданных лаборатория собственного нового корпуса машиностроительного факультета.

Прекрасно помню, как осенью 1974 года мы переезжали из подвала химкорпуса в свой корпус. Как поднимали металлорежущее оборудование с подвала, особенно такие крупногабаритные станки, как зуборезный мод. 5К32, плоскошлифовальный мод. 3Е71, токарный мод. 1К62 и другие. С этой целью прорубали (расширяли) стены окна и двери. Я только сейчас задумался, а как они туда попали, кто выполнял ту работу, это было до моего трудоустройства. А у нас была нанята профессиональная бригада такелажников (бригадира звали Володя, фамилию не помню – здоровенный мужик). Но мы тоже вместе с ними суетились, то катки подносили, то ломами поправляли направление движения станков. Главное было поднять станки с подвала и перевести до корпуса машиностроительного факультета, а уже по полу лабораторий кафедры "Технология машиностроения" мы их катали (устанавливали) как хотели. Ничего не мешало, кроме коробок на полу, для их подключения. Вскоре начали завозить новое оборудование с ЧЗПТ – чебоксарского завода промышленных тракторов. Почему-то помню цифру 102 единицы. Это отдельная песня! Как такое удалось осуществить М.Б. Гордону. Видимо, такая находчивость, упорство и стремление было создать и расширить кафедру, характеризует его как талантливого организатора, дипломата, умеющего убеждать и увлечь прежнее руководство завода в необходимости такого шага и перспективе развития машиностроения в Чувашии.

Продолжая своё повествование, хочу сказать о М.Б.Гордоне, как о человеке и что я думаю о нём. Но не знаю, с чего начать, поскольку в то время, он был так недосягаем для меня. Он был Большой Учёный, мудрый человек, мне казалось, он знает всё! И я боялся, возможно, стеснялся приблизиться к нему. Сам, по своей инициативе, не ходил к нему, а если он приглашал, то старался, как можно быстрее, выскочить из его кабинета, чтобы не создалось впечатление обо мне, как необразованном, с деревенским мышлением молодом человеке, и даже наивном и глупом. Но шло время, из-

бегать М.Б. Гордона стало просто невозможно: он сформулировал мне тему дипломной работы, обратите внимание – научной работы, с перспективой выхода кандидатской, а затем и докторской диссертации. Забегая вперед, скажу, план моей докторской диссертации мы сформулировали так, что вот уже спустя почти 40 лет я её не раскрыл до сих пор, хотя у меня самого подготовлено уже с десяток кандидатов и докторов наук, и эта работа интенсивно продолжается. Теперь судите сами, дорогие читатели, что это был за человек и какой он был учёный. Я только сейчас начинаю понимать, что М.Б. Гордон вначале создал себя, сам себя выучил и передал многие знания другим, особенно своим ученикам. Только сейчас понимаю, что он учил нас жизни, а уже потом вводил в мир науки. Я и сейчас стараюсь в этом подражать ему. Многие коллеги признаются мне, какие у меня хорошие ученики, а ответ простой: учите первоначально жизни, а уж потом профессии, проверьте – получится! Я лично горжусь своими учениками и надеюсь, они также поймут и оценят, что я для них сделал. Горжусь тем, что являюсь учеником выдающегося ученого М.Б. Гордона, который в невероятных (практически невозможных) условиях создал кафедру, научную школу, подготовил более 10 кандидатов технических наук, часть из которых стали докторами наук. Я сегодня говорю ему спасибо и благодарю за всё, что он сделал для меня и моей семьи [4, 5].

Вспоминаются отдельные памятные эпизоды нашей работы. Я уже говорил, что пришёл в университет из завода. Вот эпизод. Для создания какой-то конструкции нам нужна была титановая труба, диаметром 100 мм и длиной более 1000 мм, её нужно было проточить по наружному диаметру с минимальной шероховатостью. На то время титан был дефицитом, удалось достать только одну такую трубу. И что вы думаете – поручено было выполнить эту работу мне. Вот тут то и началось. Я её начинаю точить, а идут вибрации. Чего только я не делал (менял резцы, режимы, скорость, подачу, глубину резания, углы заточки, СОЖ…) ничего не получалось - вот тебе и токарь с 5-м разрядом. Таким образом, я провозился день, не имея результата. И не заметил, что через витраж со второго этажа за мной наблюдает М.Б. Гордон! К концу рабочего дня он ко мне спустился и дал совет: "А ты в трубу засунь камеру от автомобиля". Я в то время обиделся, бросил работу, счёл, что он надо мной посмеялся, и ушёл домой. Ночь не спал, думал. Гордыню как рукой сняло. А наутро подумал: а что я теряю? Всё равно ничего не получается! Принёс со свалки камеру, забил её в трубу. И, о чудо – получилось! Попробуйте! Этот случай я привел не случайно, а чтобы показать, кто же был М.Б. Гордон с профессиональной точки зрения. Я тогда не переставал удивляться: и откуда у него такие познания?

Дело в том, что М.Б. Гордон начал свой трудовой путь, так же как и я, учеником токаря, в совершенстве овладев этим ремеслом. И, конечно, хорошо был знаком с вибрациями при резании металлов, т.к. в 50-е годы прошлого столетия, когда ему много приходилось стоять за станком, можно характеризовать металлорежущее оборудование с недостаточной жесткостью и заменой быстрорежущего инструмента на твердосплавный, а переход на "скоростное" резание резко обнажил эти недостатки. Сыграла свою роль большая практика рабочего и учёного одновременно, что и сочетал в себе этот замечательный человек.

Другой пример связан с написанием статей и описанием экспериментальных данных. Как правило, эту работу мы начинали с чистого листа. Просто садились за стол и писали научный труд. Меня всегда поражало, как ловко и грамотно у него это получается. Я как-то сказал, что никогда этому не научусь. На что Меер Борисович спокойно ответил: "Придет время, научишься". И это правда – нужно только этого хотеть. Впоследствии, я узнал, что М.Б. Гордон почти до 13 лет не знал русского языка и изучал его самостоятельно, осваивая также грамматику и письменность. Сколько помню, он никогда не делал ошибок в русском языке. А я, русский человек, до сих пор сомневаюсь, как написать отдельные слова, где нужны запятые, а где нет. Кстати, у меня много знакомых, учёных другой национальности, которые в совершенстве знают русский язык, а русские – нет. И у меня до сих пор нет ответа на этот вопрос. Может, что-то со школьным образованием не так? Или пренебрежительным отношением к русскому языку? Может, считаем, что мы и так русские и нам не надо изучать его досконально. Короче, ответа нет!

Следует отметить и весьма любопытные детали истории, как я использовал "разрезной резец Гордона", его детище, первое открытие и первая его конструкция, без которой невозможно выполнить научные исследования трения и длины контакта стружки с передней поверхностью резца. Это одно из первых его изобретений, конструкцией этого прибора, учёные резальщики пользуются до сих пор *(Авторское свидетельство № 88039. Бюллетень изобретений, № 1, 1951 год)*. Я знал, как он дорожит этим прибором, тем не менее, решился на его использование при измерении радиальной составляющей силы резания при шлифовании (затачивании твердосплавных инструментов). К чему я клоню? К тому, что переделал его подвижную часть, усилил его чувствительность, переклеил тензодатчики, поскольку силы резания при шлифовании (затачивании) на порядок меньше, чем при реза-

нии. А эксперименты я "гнал" не только с обычными смазочно-охлаждающими жидкостями (СОЖ), но и агрессивными электролитами. Сами понимаете, электролиты этот ценный прибор и испортили, а я как бы и не причём. Зная, что этот прибор был на кафедре в единственном экземпляре, и для М.Б. Гордона он дорог и ценен, долго скрывать этого не мог – пришлось сдаваться. Как он только тогда пережил все это! Но поскольку я это помню до сих пор, видимо, не просто. И хотя наказания никакого не было, мне почему-то стыдно даже теперь. А что поделаешь – наука требует жертв!

Вспоминаю, как много усилий Меер Борисович прилагал для становления, развития и совершенствования научной школы, как с полной отдачей сил работал. Несомненно, его заслугой стала организация кафедры "Технология машиностроения" в ЧГУ им. И.Н.Ульянова и создание научной школы, охватывающей различные научные направления исследований. А ведь мало кто знает, что свою докторскую диссертацию он защищал дважды. Первый раз в 1967 году (не утвердили - в ВАКе нашлись противники его теории), второй раз в 1974 году, спустя 7 лет. Вот как деликатно даёт оценку этому периоду Д.С. Гордон, жена Меера Борисовича. "Дело в том, пишет она, что его данные были совершенно новыми и получены были новым прибором. Некоторые сомневались, другие не доверяли исследованию, сделанному в провинции" [6]. (*Дина Семёновна Гордон – родилась 22 ноября 1922 года, доктор медицинских наук, профессор, член корреспондент АЕН РФ, выдающийся ученый, признанная во всём мире, заслуженный деятель науки ЧАССР. С 1968 по 1988 год заведовала кафедрой гистологии и общей биологии в ЧГУ им. И.Н.Ульянова, подготовила 7 докторов и 27 кандидатов медицинских наук*). Возможно, эти дополнительные семь лет стоили ему потери здоровья, но и углубили его в мир микроконтактных процессов при резании металлов. И, тем не менее, это было большим ударом, но не остановило его, не сломало, а наоборот укрепило дух и волю к достижению своей цели. Он усилил свою диссертацию новыми, современными по тем временам, экспериментальными и теоретическими разработками. А мы, его ученики, в основном и продолжили исследования именно в этом направлении. Только одни продолжили изучение контактных процессов при резании сталей, чугуна, неметаллических материалов. Другие при шлифовании инструментальных, высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, а мне досталась область затачивания твердосплавных материалов (инструментов), которую мы в настоящее время развиваем при исследованиях сверхтвердых, наноструктурированных и наноупрочненных материалов, естественно, на атомно-молекулярном уровне.

Расцвет научной деятельности М.Б. Гордона пришёлся на вторую половину прошлого века. Целый ряд открытий был получен с его участием. Это, прежде всего, создание нового класса синтетических и полусинтетических СОЖ - СУВАР (названных в честь древнего чувашского народа), техники и технологии использования СОЖ в распыленном состоянии, теории и практики исследования контактных процессов при резании, шлифовании и затачивании. Под его научной редакцией вышли в свет серии научных межвузовских сборников: "Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов", "Повышение качества смазочно-охлаждающих жидкостей и режущих инструментов", "Теоретические и практические аспекты теории контактных взаимодействий при резании металлов". При этом основную работу выполнял сам, никогда не жаловался, с трепетом и доброжелательностью относился к своим ученикам.

С каким огромным уважением относились мои родители и все мои близкие родственники к семье М.Б. Гордона (на то есть отдельные причины) и ему самому. В 2004 году я защитил докторскую диссертацию, идя к своей цели тяжёло, трудным путём. С М.Б. Гордоном мы планировали закончить и осуществить защиту докторской диссертации в 1992 году, тогда мне было чуть больше 40 лет. Но переезд в г. Братск, становление кафедры и своей научной школы, заняло у меня более 10 лет. После защиты я привёз отцу свою первую монографию и диплом доктора технических наук. И первое, о чём он меня спросил: "Так ты что, стал таким же, как Гордон". Я ответил, что да! Думаю, что отец был горд этим, поскольку до меня доходили слухи о том, как он рассказывал своим друзьям, что его старший сын стал таким же, как М.Б. Гордон. Для меня признание родителями моих успехов стало наивысшей похвалой.

Я уже отмечал, как трепетно М.Б. Гордон относился к своим ученикам, особенно молодым. Развитие науки по созданию новых СОЖ и исследованию микроконтактных процессов требовало участия думающих, неординарных, с новым независимым взглядом на проблемы резания и механообработки молодых ребят. Таким образом, вскоре на кафедре появились, выпускник химфака В.М. Федоров *(В.М. Федоров – один из разработчиков новых синтетических СОЖ, лауреат премии Ленинского комсомола)*, затем выпускник кафедры физики А.И. Никитин *(А.И. Никитин – впоследствии стал одним из разработчиков алмазоподобных покрытий)*. М.Б. Гордон их оберегал, они были больше теоретики, а не работяги, как некоторые из нас. Помимо исследовательской работы, было много и

черновой, рутинной, которую мы выполняли. Скажу только за себя – после очередного поручения, я набрался смелости и сказал: «Меер Борисович, почему всё я да я должен делать подобную работу?», а он мне в ответ: «А кто?» Я: "Ну, хотя бы Лёша Никитин". После чего Гордон долго ворчал и говорил: "Это же надо, я в коем-то веке придумал что-то важное, а он (т.е. я), решил всё испортить". И на самом деле получалось, что я во всем виноват. Сколько дальше помню, я уже ни от чего больше не отказывался, а шёл и делал. Это было и дешевле, и приятнее.

Так, по мере постановки задач и их решения, на кафедре появлялись новые люди. Кафедра расширялась, набирала силу. Было время, когда на кафедре одновременно работали более 40 человек. Примерно половина из них – ППС, остальные - УВП, работники НИС и отраслевой лаборатории проблем СОЖ, обрабатываемости и качества (ОНИЛОК – отраслевая научно-исследовательская лаборатория обрабатываемости и качества). Заказчик – Министерство тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. Работы хватало всем! Когда появился достаточный научный задел, сформировалось и наше научное направление – по технологии прогрессивных методов затачивания режущих инструментов [5, 7]. В этом направлении выполнялись хоздоговорные НИР, а потом состоялись защиты. В 1980 году в диссертационном совете В.Ф. Боброва при Тульском политехническом институте защитилась Н.Р. Лосева (по затачиванию быстрорежущих инструментов), которая впоследствии стала прекрасным преподавателем, а также моим учителем, наставником и другом нашей семьи. А в 1984 году в диссертационном совете М.И. Клушина при Горьковском политехническом институте по затачиванию твердосплавных инструментов защитился и я, к тому времени у меня в семье родился второй сын – Серёжа. Следует также сказать, что хоздоговорные НИР мы выполняли, чуть ли не по всему Советскому Союзу. Мне, по молодости, кроме предприятий города Чебоксары, нравились договора с Ташкентом (НПО «Технолог») и Павлодаром (Павлодарский тракторный завод). Поскольку тогда мы успевали сделать и внедрения научных результатов, и посетить памятные места тех регионов, где находились, успевали съездить на экскурсии в Бухару, Самарканд, посетить окрестности Ташкента…

Про лекции М.Б. Гордона надо сказать отдельно. Как он их читал студентам! Мне они не просто нравились, я был в восторге от того, что слушать их было интересно! Его не торопливое изложение лекций позволяло их полностью законспектировать. Он выдавал каждую фразу, предложение, как будто это настолько важно, что жить без этого нельзя. И СОЖ для него было лекарством для механообработки. Поскольку он так считал, и все с этим утверждением соглашались, что процесс резания больной и лекарством для него должна быть СОЖ, но для каждой технологической операции она должна быть своя, как для больного: заболел одним заболеванием, возьми такое лекарство, другую, же болезнь нужно лечить другим лекарством. Однако он не забывал и об унификации СОЖ.

Унификация – в переводе с греческого языка "приведение к единообразию". Я хочу сказать, что и тогда уже решалась задача сокращения количества наименований технологических сред и поиск универсальных для многих технологических операций, сведения их количества к 3-4 наименованиям для машиностроительного производства. Это особенно важно при централизованной раздачи СОЖ на предприятии. Но меня куда-то понесло, к профессиональному решению задач по созданию и использованию СОЖ.

Вернёмся к лекциям. Готовя данную статью, я наткнулся в интернете, на высказывание одного из бывших студентов М.Б. Гордона, может, мы когда-то вместе сидели в одной аудитории, слушая заворожительные лекции этого профессионала.

Вот его высказывания: "Старая, избитая и испитая истина, студент – не емкость для наполнения его знаниями, а потенциальное горючее для воспламенения его любопытства и стремления добыть эти знания. И, увы, в своей жизни, немногих встретившихся на моем пути преподавателей, я мог бы считать по-настоящему пассионарными! Один из них был, увы, уже давно умерший, но хорошо запомнившийся выпускникам тех лет, Меер Борисович Гордон! Вот это были лекции по «Технологии машиностроения»! Гимн железкам, иначе не назвать! Интересно было безумно!" [8]. Я подписываюсь под этими словами, полностью согласен!

Сегодня можно утверждать, что большая часть спланированных М.Б. Гордоном задач выполнена, поддержана учеными и продолжена его учениками, выдержала испытания временем и сохранила свое значение до наших дней.

Александр Сергеевич Янюшкин,
заведующий кафедрой "Технология машиностроения",
доктор технических наук, профессор, академик МАН ВШ.
Ученик М.Б. Гордона.
18.05.2017 год

Литература:

1. Гордон Меер Борисович. Ученые Чувашского университета: (1967-1992) // – Чебоксары, 1992. – С. 51-52.
2. Сергеев, Т.С. Гордон Меер Борисович / Т.С. Сергеев // Краткая чувашская энциклопедия. – Чебоксары, 2001. – С. 126.
3. Сергеев, Т.С. Гордон Меер Борисович / Т.С. Сергеев // Чувашская энциклопедия. – Чебоксары, 2006. Т. 1: А-Е. – С. 428.
4. Творческие вехи юбиляра – ученого и педагога // Вестн. Чуваш. ун-та. 1997. № 1. – С. 217-219.
5. Янюшкин, А.С. От рабочего до ученого / А.С. Янюшкин // Совет. Чувашия. 1987. – 17 мая.
6. Сергеева В.Е. Дина Семеновна Гордон (к 90-летию со дня рождения)// Морфология. - Санкт-Петербург. Изд-во "ЭСКУЛАП". 2012. С. 107-108. [Электронный ресурс]: http://elibrary.ru/item.asp?id=17833686.
7. Гордон М.Б., Янюшкин А.С. Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий. Вестник машиностроения. 1984. № 3. С. 12-14.
8. [Электронный ресурс]: https://forum.na-svyazi.ru/?showtopic=239012&st=150.

Memoirs, are devoted to M. B. Gordon's memory, formation and development of Technology of Mechanical Engineering department in ChGU of I. N. Ulyanov

Yanyushkin A.S.
665709, Russia, Irkutsk region, Bratsk, Makarenko str. 40, Bratsk State University
Yanyushkin@brstu.ru

Keywords: school of sciences, history of development, direction of researches, results, electrodiamond processing, efficiency, publications, prospect

Information on life and activity of the prominent scientist, professor M. B. Gordon is provided in article. Separate stages of his course of life, the basis and development of Technology of Mechanical Engineering department in ChGU of I. N. Ulyanov are noted. The scientific directions of researches developed by M. B. Gordon are noted. The practical importance of the executed researches for science and production is reflected. Theoretical studies based on the main provisions of the theory of cutting of metals and technology create a new class of synthetic lubricating-cooling liquids (Sozh), technik is the use of coolant in an atomized state, the development of methods and devices used to control the process combined machining high strength and hard materials, guaranteeing high quality of products. Theories and practicians of a research of microcontact processes when cutting, grinding and sharpening, M. B. Gordon's opening made in the second half of the last century. Responses and assessment of work of his pupils.

УДК 621.9.01

Перспективы развития научной школы кафедры "Технология машиностроения" Братского государственного университета

Янюшкин А.С.

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
yanyushkin@brstu.ru

Ключевые слова: научная школа, история развития, направления исследований, результаты, электроалмазная обработка, эффективность, публикации, перспектива

В статье представлена информация о развитии научной школы профессора Янюшкина А.С. Отмечены научные направления исследований, обозначена практическая значимость выполненных исследований для науки и производства. Теоретические исследования базируются на основных положениях электрофизики и электрохимии, теоретической механики, математической статистики, технологии машиностроения, теории резания, физики твердого тела, теории планирования эксперимента; численных методах решения систем дифференциальных уравнений, статистической обработки экспериментальных данных и регрессионного моделирования. Полученные результаты открывают новые направления развития исследований в науке и технике, разработке способов и устройств управления процессом комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, позволяют автоматически поддерживать заданные условия в зоне резания, гарантирующие высокое качество обработанной поверхности, экономичность и производительность шлифовальной операции.

Научный руководитель НШ: Янюшкин Александр Сергеевич, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», доктор технических наук, профессор, академик МАН ВШ, член-корреспондент САН ВШ, член международного союза машиностроителей, член правления Ассоциации технологов-машиностроителей России. Почетный работник высшего профессионального образования РФ. В настоящее время член редакционных советов научных журналов: «Системы. Методы. Технологии», "Вестник БГТУ", «Актуальные проблемы в машиностроении», «Обработка металлов». Эксперт Министерства образования и науки РФ в научно-технической сфере. Эксперт НИР в области машиностроения по Красноярскому краю. Почетный доктор ДГМА.

Основные научные результаты коллектива:

Разработаны элементы теоретические основы микроконтактных процессов в зоне резания при механической обработке различных материалов.

Разработаны основы теории контактирования обрабатываемых композиционных и сверхтвердых материалов с образованием поверхностного слоя заданных характеристик. Выбраны приоритетные параметры процессов комбинированной электроалмазной обработки.

Разработана модель формирования поверхностного слоя деталей машин с учётом модели контактирования.

Дано математическое описание основных процессов, участвующих в комбинированной обработке высокопрочных и труднообрабатываемых материалов с оценкой их влияния на качество поверхностного слоя.

Выявлены основные факторы, влияющие на формирование поверхностного слоя деталей машин при комбинированной электроалмазной обработке.

Созданы специализированное оборудование, технологическая оснастка, электрические схемы под комбинированные методы обработки с их модернизацией.

Разработаны теоретические основы физико-химических процессов, протекающих при комбинированной электроалмазной обработке высокопрочных и труднообрабатываемых материалов.

Научным коллективом только за последние 10 лет издано: 9 монографий, 18 учебных пособий, опубликовано более 400 научных работ, получено более 30 патентов РФ и авторских свидетельств, подготовлено более 10 кандидатов и докторов технических наук, часть из которых в настоящее время составляют коллектив кафедры «Технология машиностроения». Остепенённость кафедры 100%, средний возраст менее 40 лет, а наличие в её составе 2 докторов технических наук, работающих в одном направлении, делают НШ уникальной, работоспособной и перспективной.

За прошедший период члены НШ участвовали в десятках различного уровня конференций, симпозиумах, выставках, получили более 100 наград и дипломов. Оформили и подали на конкурсы Федерального значения более 70 заявок, из них более 20 заявок прошли положительную экспертизу. Уникальность полученных Грантов заключается в том, что для Братского государственного университета они получены впервые.

Для ФГБОУ ВО "БрГУ" вклад НШ весьма существенен [1-59]. Если сравнить достигнутые показатели НШ по индексу цитирования, публикациям в изданиях рекомендованных ВАК, монографиям, а также зарубежным изданиям с показателями всего университета, то эти показатели отразятся следующим образом (таблица 1).

Таблица 1

Основные показатели НШ (по данным РИНЦ на 15.04.2017 года)

Наименование показателей	Показатели БрГУ	Показатели НШ	Показатель НШ в процентах, %
Индекс научного цитирования	15535	7520	48
Публикации РИНЦ	6560	746	11,4
Публикации ВАК	958	176	18,5
Число статей в зарубежных изданиях	51	21	41,2
Число статей в журналах, входящих в Web of Science или Scopus (за последние 5 лет)	18	11	61

Формулировка решаемой проблемы: Проведённый нашим коллективом всесторонний анализ состояния исследований в области прогрессивных комбинированных электрофизических и электрохимических методов обработки инструментальных, труднообрабатываемых композиционных и наноструктурных материалов позволил отметить следующее. Как в Российской Федерации, так и за рубежом, данным исследованиям уделяется недостаточное внимание. В наиболее развитых странах отмечены некоторые тенденции развития электроэрозионной, абразивной обработок, возможности комбинирования различных процессов съема материала по сравнению с обработкой резанием, разработки и совершенствования электроэрозионных станков. Однако в свете высокой производительности электроэрозионной обработки выявляется один из недостатков данного вида обработки - относительно невысокая точность получаемых размеров, а также большая величина дефектного слоя после обработки. Известно, что одним из главных требований к инструментальным материалам является их высокая твёрдость, что приводит к трудоёмкости восстановления их режущих свойств инструмента при шлифовании и затачивании, включая значительные затраты времени. Те методы правки, которые в настоящее время используют промышленные и зарубежные предприятия, не позволяют достигать требуемых характеристик, как изготавливаемых деталей машин, так и шлифовальных кругов, обрабатываемых эти изделия. Здесь чётко прослеживается слабая связь науки с производственными условиями, отсутствие достаточно простых и надёжных способов управления процессами, протекающими в зоне обработки. Это в свою очередь является следствием недостаточного использования комбинированных электроалмазных методов обработки и учета условий контактного взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами. Хотя известно, что причина снижения функциональных параметров в процессе обработки заключается в засаливании алмазных кругов, что приводит к возрастанию сил резания, температуры, расходу алмазных кругов и, как следствие, к ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Поэтому, необходимо изучить процессы в зоне контакта, математически описать причину засаливания и создать благоприятные условия для качественной обработки изделий из инструментальных, высокопрочных композиционных и наноструктурных материалов.

Цели научного исследования: В настоящее время отечественная промышленность выпускает ряд композиционных материалов, считающихся обладателями самых высоких характеристик по твёрдости и прочности. Они нашли своё применение в разнообразных отраслях машиностроения и инструментальной промышленности. Однако классическое производство оказалось технологически не подготовлено к таким их характеристикам, а рекомендации по применению данных материалов ограничились лишь «щадящими» условиями их эксплуатации, что с экономической точки зрения, конечно, не выгодно. Исследования, выполненные на нашей кафедре, однозначно это доказывают. Однако технический прогресс не должен стоять на месте и на смену композиционным сверхтвёрдым, высокопрочным и труднообрабатываемым материалам уже приходит новое поколение материалов – функциональных, композиционных и конструкционных наноматериалов, в том числе и разрабаты-

ваемых на нашей кафедре. Анализ развития существующей ситуации показал, что в ближайшее время одной из главных проблем, препятствующей эффективному использованию и дальнейшему развитию потенциала нанотехнологий в Российской Федерации, будет являться увеличивающееся отставание от мирового уровня базового, технологического компонента инфраструктуры наноиндустрии. Другими словами, следствием скачка в области создания новых инструментальных материалов, как правило, будет являться традиционное отсутствие технологии обработки данных материалов, технологии восстановления их технологических свойств. Разработка и сопровождение инновационной технологии высокоточной качественной обработки инструментальных, высокопрочных композиционных и наноструктурных материалов составляет суть данных исследований.

Задачи научного исследования: В числе основных задач, первостепенными являются: исследования природы засаливания абразивных кругов на металлической связке при комбинированной электроалмазной обработке; исследования процесса формирования поверхностного слоя детали из новых наноупрочненных материалов при комбинированной электроалмазной обработке; выявление факторов, влияющих на формирование поверхностного слоя при комбинированной электроалмазной обработке высокопрочных, труднообрабатываемых композиционных и наноструктурных материалов. Требуется разработать способ управления процессом комбинированного электроалмазного шлифования обеспечивающий гарантированное качество обработанной поверхности и изделия в целом. Разработать устройство для автоматического управления процессом непрерывной правки алмазного круга на металлической связке, позволяющее снизить удельный расход алмазных кругов, мощность, силы резания и др. параметры. Определить теоретические модели электрических параметров (плотности тока правки круга и плотности тока травления), позволяющие рассчитать значения данных параметров, при которых достигается наилучшее качество обработанной поверхности. Получить эмпирические зависимости удельного съема металла, шероховатости обработанной поверхности, глубины дефектного слоя, удельного расхода круга, мощности и составляющие силы резания от режимов обработки при комбинированном электроалмазном шлифовании. Создать новое оборудование с более широкими техническими возможностями, отвечающее мировому уровню.

Содержание исследования: При обработке изделий из высокопрочных наноупрочненных инструментальных материалов, в процессе затачивания металлорежущего инструмента или шлифования ответственных поверхностей деталей машин, практически не применяют шлифовальные алмазные круги на металлической связке. Известная справочная литература не рекомендует обрабатывать инструментальные стали алмазным инструментом, за исключением лишь чистовой, окончательной обработки. В первую очередь это связано с интенсивным засаливанием шлифовального круга и, как следствие, потери его режущей способности, что влечёт за собой появление на обрабатываемой поверхности разнообразных дефектов в виде прижогов, макро микротрещин, изменения структуры поверхностных слоев и т.п. Однако, экспериментальные исследования, проведённые нашим коллективом, однозначно доказывают: если создать соответствующие специфические и, главное, недорогие в эксплуатации условия, то алмаз и алмазные инструменты при такой обработке показывает высокие режущие способности. Так, было доказано, что в процессе шлифования образуется граница контакта, которая одновременно принадлежит инструментальному и обрабатываемому материалам. Протекающие здесь контактные процессы и реакции ответственны как за засаливание круга, так и образование дефектного слоя, и работоспособность инструмента в целом. На стадии исследования внешней картины алмазоносной поверхности шлифовальных кругов и дефектного слоя заточенных пластин из инструментальных сталей, чётко проявились преимущества комбинированной электроалмазной обработки. Круг имеет развитую режущую поверхность, а засаливание практически отсутствует, о чём говорит развитый рельеф поверхности алмазного круга. Если же рассматривать обычное алмазное шлифование инструментальных материалов алмазными кругами, то в данном случае происходит постепенное засаливание круга. Однако, вопреки сложившемуся мнению, что поры круга и алмазные зерна всего лишь забиваются компонентами обрабатываемого материала, в засаленном слое наблюдаются элементы как самой связки круга, так и вторичных соединений, образующихся в результате адгезионно-диффузионных явлений, химических реакций и рекристаллизации. Зафиксированные в зоне контакта химические элементы, в частности, алюминий, медь, олово, цинк и железо являются продуктами диффузии, которые при взаимодействии с углеродом и кислородом, приводят к образованию новых карбидов и окислов. Усиление же и локализация диффузионных процессов возникает при интенсификации режимов шлифования, когда не только локальные, но и средние температуры в зонах контакта достигают высоких значений (более 1000°С). Для исключения большинства подобных негативных процессов, возникающих при алмазной обработке железоуглеродистых материалов, в том числе высокопрочных композиционных, и наноструктурных, следует, в первую очередь, создать наи-

более благоприятные условия для алмазного инструмента, обеспечить ему условия, при которых абразивные круги работали бы в режиме самозатачивания. Достичь этой цели можно управляя электрическими характеристиками обработки, «подобрав» оптимальные режимы, плотности тока правки и травления. Практика показывает, что режим устойчивого самозатачивания наиболее полно реализуется в условиях непрерывной, электрохимической правки круга и одновременного травления (анодного растворения) обрабатываемой поверхности и характеризуется постоянством радиальной составляющей силы и мощности резания. В качестве научного и производственного результата мы получаем преимущество комбинированной обработки перед простыми методами электроалмазного шлифования по важнейшим параметрам: величине дефектного слоя и качеству изготавливаемых изделий; удельному расходу алмазов и режущей способности. Поэтому авторы рекомендуют использовать данную технологию в различных отраслях промышленности для шлифования и затачивания самых разнообразных инструментов: резцов, фрез, зенкеров, свёрл, ответственных изделий машиностроения и т.д. При этом требуется несложная модернизация оборудования, которая осуществима практически на всех видах заточных и шлифовальных станков, а также создание нового вида оборудования с более широкими технологическими возможностями.

Новизна научного исследования: Позволяет решать принципиально новые задачи с учётом: - теоретических основ контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов, причин засаливания алмазных кругов на металлической связке; - научного обоснования критериев оценки режима и условий самозатачивания, обеспечивающих постоянство режущей способности и минимального расхода алмазных кругов; - метода количественного определения энергии адгезионно-диффузионного взаимодействия контактирующих материалов, доказательстве механо-физико-химической природы процесса засаливания, разработанных рекомендаций по устранению этого негативного явления. Усовершенствование известных результатов: - предложенной классификацией дефектов при электроалмазной обработке высокопрочных наноструктурных материалов, установлением их связи со стойкостью инструмента, определением уровней механических и электрических параметров обработки, гарантирующих высокое качество изделий машиностроения. Открывает новые направления развития исследований в науке и технике: - в разработке способа и устройства управления процессом комбинированного электроалмазного шлифования, позволяющих автоматически поддерживать заданные условия в зоне резания, значительно повысить качество обработанной поверхности и производительность шлифовальной операции. Получен принципиально новый результат: - с учётом математических моделей технологического процесса комбинированного электроалмазного шлифования, позволяющих определить значения электрических параметров плотности тока правки круга и плотности тока травления, учитывающих изменения условий обработки, при которых достигается наилучшее качество обработанной поверхности; - с применением эмпирических зависимостей шероховатости обработанной поверхности, глубины дефектного слоя, удельного съема металла, удельного расхода круга, эффективной мощности и радиальной составляющей силы резания от режимов обработки при комбинированном электроалмазном шлифовании, на основе которых определяются рациональные режимы шлифования.

Ожидаемые результаты исследования заключаются:

– в новых научных знаниях о процессах, явлениях, закономерностях, существующих в исследуемой области, позволят прогнозировать и получать качественные показатели обработанной поверхности и обоснованно назначать режимы работы оборудования при комбинированном электроалмазном шлифовании;

– открытиях новых явлений и закономерностей, разработанных и предложенных промышленности в рамках технологии обработки изделий из высокопрочных композиционных и наноупрочненных материалов, включающих различные варианты модернизации и разработку нового оборудования (электрические схемы и источники технологического тока), что позволит вывести отдельные отрасли машиностроения на мировой уровень;

– теоретическом и методологическом обосновании принципов, путей создания и реализации в области промышленного использования эффективного комбинированного метода электроалмазной обработки высокопрочных композиционных и наноструктурных материалов, обеспечивающих их высокое качество и эксплуатационные характеристики при минимальных энергетических затратах.

Полученные результаты окажут влияние на развитие новых научно-технических и технологических направлений, разработку новых технических решений, последующие НИР и ОКР, увеличение выпуска новых изделий в машиностроении, изготовленных их высокопрочных и наноструктурных материалов. Разработка рекомендаций и предложений по использованию результатов в выполняемых

инновационных проектах позволят вывести отечественную продукцию машиностроения на современный мировой уровень.

Дальнейшие перспективные исследования продолжаются в следующих направлениях:

– разработка теоретических основ процесса комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов;

– разработка инновационной технологии высокоточной обработки инструментальных и наноструктурных материалов;

– автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в машиностроении;

– проектирование и разработка технологии изготовления прогрессивных конструкций сложнопрофильного режущего инструмента;

– теория, практика и исследование нейтральных технологических сред взамен агрессивных электролитов в процессах электрохимической обработки;

– разработка технологии изготовления сложнопрофильных инструментов для обработки композиционных материалов;

– разработка управляющих программ и создание баз данных для совершенствования технологических процессов механической обработки деталей машин и инструментов.

Следует отметить, что мы готовы к диалогу и научному сотрудничеству с другими научными школами как в России, так и за рубежом, а также совместным публикациям и выполнению Грантов различного уровня.

Литература:

1. Гордон М.Б., Янюшкин А.С. Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий. Вестник машиностроения. 1984. – № 3. – С. 12-14.

2. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: моногр. / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. Братск: БрГУ, 2009. 228 с.

3. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании. Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183-190.

4. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов. Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.

5. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали. Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 26-30.

6. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91-102.

7. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Медведева О.И., Ковалевский С.В., Рычков Д.А. Электроалмазная обработка высокопрочных материалов с нанесением защитных покрытий // Системы. Методы. Технологии. 2013. №3 (19). С. 125-129.

8. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114-120.

9. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68-74.

10. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799-800. С. 291-298.

11. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов. Системы. Методы. Технологии. 2010. – № 7. – С. 87–91.

12. Янюшкин А.С., Кудряшов С.М., Архипов П.В. Перспективный метод обработки твердого сплава на плоскошлифовальном станке. Системы. Методы. Технологии. 2009. – № 4. – С. 71–74.

13. Янюшкин А.С. и др. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга. Патент РФ на изобретение №2239525 по заявке № 2003105413, приоритет 25.02.2003. Опубл.10.11.2004. Бюл. № 31. – 8 с.

14. Янюшкин А.С. и др. Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом с его одновременной правкой. Патент РФ на изобретение № 2268118 по заявке № 2004118239/02 приоритет 15.06.2006. Опубл. 20.01.2006. – Бюл. № 2. – 4 с.

15. Сурьев А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Братский государственный технический университет. Братск, 2005. 146 с.

16. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой. Системы. Методы. Технологии. № 1(5). – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 132–138.

17. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала. Технология металлов. 2010. – № 1. – С. 25–33.

18. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение – 1, 2004. 230 с.

19. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Роль адгезии и диффузии в процессе засаливания алмазных кругов на металлической связке // Справ. Инж. журн. 2007. №7. С.32-40.

20. Михалев О.Н., Янюшкин А.С. Программная реализация автоматизированного проектирования обработки точных отверстий на станках фрезерно-сверлильно-расточной группы с ЧПУ// Технология машиностроения. - М.: Издательский центр Технология машиностроения, 2008.- №10- С. 44-48.

21. Михалев О.Н., Янюшкин А.С. Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем при проектировании обработки точных отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ// Вестник компьютерных и информационных технологий. - М.: Машиностроение, 2008. – №5(47) – С. 33-38.

22. Михалев О.Н., Янюшкин А.С. Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми ч. Ч. 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 25-29.

23. Янюшкин А.С., Михалев О.Н. Система автоматизированного проектирования технологической подготовки производства на станках с ЧПУ (САПР ТПП ЧПУ v. 1.0). РОСПАТЕНТ. Регистрационный №2008614323 от 24.09.2008.

24. Кузнецов А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твердосплавным инструментом // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Братск, 2009. 217 с.

25. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем устранения их засаливания: дис. … канд. техн. наук. Братск, 2010. 178 с.

26. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с перпендикулярным расположением токопроводящих вставок: пат. 144707. Рос. Федерация. № 2014105640/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.

27. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок: пат. 145108. Рос. Федерация. № 2014105639/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. 25.

28. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок: пат. 144708. Рос. Федерация. № 2014105641/02; заявл. 14.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. 24.

29. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сурьев А.А. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 105-109.

30. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29.

31. Архипов П.В., Медведева О.И., Янюшкин А.С. Дефекты и напряжения в твердосплавных материалах при алмазной обработке // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 1. № 8. С. 138-139.

32. Рычков Д.А. Совершенствование процесса подготовки режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иркутский государственный технический университет. Братск, 2011. 190 с.

33. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.

34. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6-13.

35. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // САПР и графика. 2011. № 3 (173). С. 71-73.

36. Скрипняк Е.Г., Лобанов Д.В., Скрипняк В.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.А., Рычков Д.А. Керамические нанокомпозиты на основе диборида циркония // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 95-98.

37. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface quality of the fiberglass composite material after milling // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 682. С. 183-187.

38. Лобанов Д.В. Совершенствование технологии затачивания твердосплавного деоеворежущего инструмента // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сибирский государственный технологический университет. Братск, 2005. 148 с.

39. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Кузнецов А.М. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 153-157.

40. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 91-94.

41. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 42-46.

42. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: монография / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. - Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 296 с.

43. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 2. С. 156-157.

44. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composites // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 3. С. 236-239.

45. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов // СТИН. 2010. № 11. С. 2-4.

46. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов // Технология машиностроения. 2011. № 5. С. 20-25.

47. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Организационно-технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-2 (292). С. 17-23.

48. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Автоматизация организационной подготовки инструмента для обработки композиционных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2013. № 3. С. 3-9.

49. Лобанов Д.В. Разработка и реализация технологических методов создания, изготовления и выбора фрезерного инструмента для эффективной обработки композиционных неметаллических материалов. диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2013 - 411 с.

50. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation tool preparation in the conditions of production // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 770. С. 739-743.

51. Скрипняк В.В., Лобанов Д.В., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине из композиционного материала (WC - Co) при алмазном затачивании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 4 (24). С. 99-110.

52. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22-29.

53. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15.№ 1. С. 35-46.

54. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.

55. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Лосев Е.Д. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. № 1(55). С. 20 – 24.

56. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т.8. №1. С. 139-151.

57. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., V.Yu. Skeeba. The Research into the Effect of conditions of combined Electric Powered Diamond Processing on Cutting Power // Key Engineering Materials. 2017. V ol. 142. pp. 942-947. doi: 10.4028/www.scientific. net/KEM.736.81.

58. Архипов П.В., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Попов В.Ю. Повышение эффективности комбинированного электрохимического шлифования твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 2(68). С. 3 – 8.

59. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах - основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1(74). С. 30-39.

Perspectives of development of school of sciences of chair "Technoloque of machine industry" of Bratsk state university

Yanyushkin A.S.
665709, Russia, Irkutsk region, Bratsk, Makarenko str. 40, Bratsk State University
yanyushkin@brstu.ru

Keywords: school of sciences, history of development, direction of probes, results, electrodiamond handling, efficiency, grants, perspective

This article provides information on the history and stages of development of the scientific school of professor Yanyushkin A.S. Noted scientific research directions, indicated by the practical significance of the research for science and industry. Theoretical researches based on the main provisions of electro-physics and electrochemistry, theoretical mechanics, mathematical statistics, mechanical engineering, cutting theory, solid state physics, experiment planning theory; numerical methods for solving systems of differential equations, statistical processing of the experimental data and regression modeling. These results open new directions of research in science and technology, the development of methods and devices the process control of combined elektro-diamond processing high-strength and hard materials, allows you to automatically maintain the predetermined conditions in the cutting area, guarantee of high surface quality, efficiency and performance of the grinding operation.

УДК 621.09.01

Особенности стружкообразования при термофрикционном фрезоточении

Шеров К.Т.[1,a], Мусаев М.М.[1,b]

[1]Карагандинский государственный технический университет, Б. Мира 56, г. Караганда, Казахстан
[a]shkt1965@mail.ru, [b]kstu_mmm@mail.ru

Ключевые слова: Термофрикционное фрезоточение, стружкообразования, корень стружки, структурный угол, заторможенный слой, пластическое деформирование

В данной работе представлены результаты исследования стружкообразования при обработке стали 30ХГСА термофрикционным фрезоточением. При изучении процесса стружкообразования использован металлографический метод исследования. Исследована зона корня стружки, которая является самой напряженной зоной и зоной наибольшего давления и интенсивного теплообразования. А также для изучения текстуры были получены образцы стружки. Для улучшения структуры поверхности образцов выполнялись их запрессовка, шлифовка и травление электролитическим методом. Для того, чтобы иметь более подробную информацию о процессах, происходящих в зоне стружкообразования, была приведена схема образования стружки при термофрикционном фрезоточении. Результаты исследования показали, что в процессе термофрикционного фрезоточения структурных превращений не происходит, а также материал в контактных слоях сохраняет исходное фазовое состояние и претерпевает изменения только вследствие пластического деформирования.

Актуальность исследования. Важнейшими условиями повышения конкурентоспособности выпускаемых изделий являются повышение производительности, снижение затрат и повышение качества при их производстве.

При токарной обработке труднообрабатываемых материалов одной из основных причин, влияющих на качество и производительность резания, является образование сливной стружки различной формы и размеров. С созданием многофункциональных токарных станков, снабженных инструментальной головкой с собственным приводом, появилась возможность осуществления операции фрезоточения, которая устраняет отмеченные трудности [1,2]. Авторами в рамках выполнения грантовой темы: 2162/ГФ4 «Разработка конструкций специального станка, позволяющего подачу импульсного охлаждения и замену режущего инструмента из твердого сплава на инструмент из конструкционной стали при термофрикционной резке металлических заготовок» исследован способ термофрикционного фрезоточения с использованием специального режущего инструмента - фрикционной фрезы [3,4].

Одним из основных отличий разрабатываемого способа является использование специальной фрикционной фрезы из неинструментального материала взамен стандартных торцовых фрез. Изучение и исследование процесса образования стружки имеет как научно-теоретическое, так и практическое значение. Тем более это является важным при разработке новых способов обработки резанием, где результаты исследования стружкообразования могут наталкивать на совершенствование конструктивных элементов режущего инструмента, а также позволят объяснить и правильно использовать на практике силовые и стойкостные зависимости.

В связи с этим работа, направленная на исследование механизма образования стружки и деформированного состояния материала при обработке термофрикционным фрезоточением, является актуальной задачей.

Методика и оборудование для проведения исследования. Задачи, поставленные в работе, решались экспериментальными и теоретическими методами. В теоретических исследованиях применены основные положения теории резания материалов, теории пластичности и упругости, теории стружкообразования, технологии металлов, материаловедения. В

экспериментальных исследованиях применен металлографический метод по микрошлифам корней стружки.

Исследования проводились с использованием оборудования лабораторий инженерного профиля (ЛИП) и МЦМ Карагандинского государственного технического университета. Были использованы: пресс CitoPress, автоматический станок LaboPol-5 для шлифования и полирования образцов, автоматическое устройство для электролитического полирования и травления металлографических образцов, универсальный металлографический микроскоп Альтами МЕТ 5Т, микроскоп металлографический ЛОМО МЕТАМ РВ-21. Термофрикционное фрезоточение образцов из стали 30ХГСА осуществлялись на токарно-винторезном станке JET GH-1640ZX с использованием специального устройства.

Экспериментальное исследование и обсуждения. На рисунке 2 показаны фотографии стружек, полученные при обработке стали 30ХГСА на различных режимах резания [4].

Рис.2. Фотографии стружек, полученные при обработке стали 30ХГСА

Рис. 3. Образцы стружки полученные после запрессовки

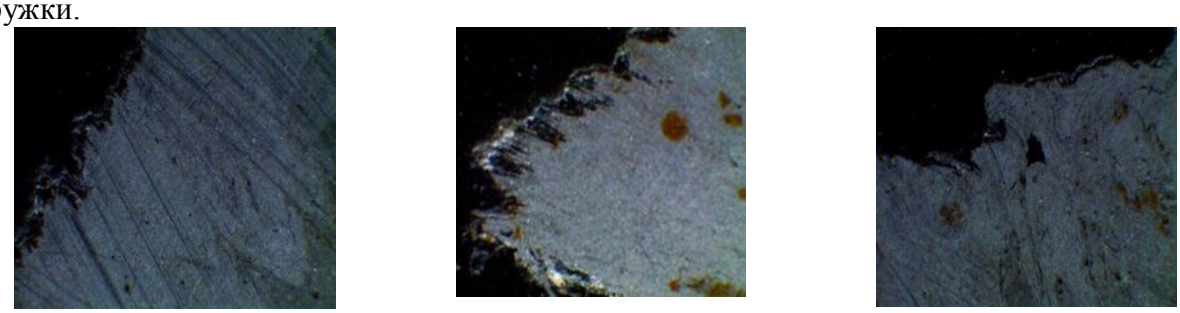
Для выполнения исследования по изучению текстуры стружки были получены образцы (стружек) одинаковых размеров, что делает фиксацию в автоматические держатели простой и удобной для дальнейших этапов подготовки. Для этого проводим горячую запрессовку образцов стружки на прессе CitoPress-1, в котором образец, вместе со специальной смолой для запрессовки, помещается в запрессовочный цилиндр. На рисунке 3 показаны образцы стружки, полученные после запрессовки.

После запрессовки образцов стружки производим шлифовку. Шлифовка является наиболее важной операцией в технологии изготовления образцов. Для шлифования запрессованных образцов использовался шлифовально-полировальный станок LaboPol-5.

Абразивные материалы, применяемые при шлифовании, классифицируют по размеру частиц. В процесе шлифования сначала использовали наиболее мелкозернистый материал и каждая последующая операция шлифования сопровождалась уменьшением зернистости применяемого абразива.

Для улучшения структуры поверхности отполированных образцов применяли электролитический метод травления. Данный метод травления дает не только блестящую гладкую поверхность без образования наклепа или аморфного слоя, но выявляет и структурные дефекты (поры, включения и т.д.). Все операции проводились на автоматическом устройстве для электролитического полирования и травления металлографических образцов LectroPol-5.

На рисунке 4 показаны микрофотографии (с увеличением 50Х) текстуры образцов стружки.



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Микрофотографии текстуры (с увеличением 50Х) образцов стружки

Микрофотографии образцов стружек были получены на универсальном металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 5Т.

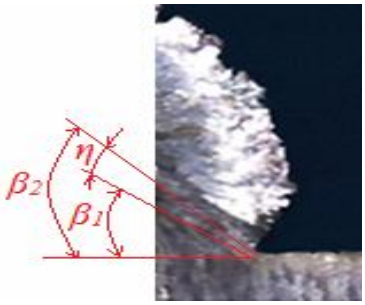
Из микрофотографии текстуры видно, что линии текстуры параллельны передней поверхности и структурные превращения при резании отсутствуют. Это объясняется тем, что столь короткий промежуток времени для структурных превращений недостаточен, так как в процессе термофрикционного фрезоточения одновременно вращается инструмент и заготовка. Материал в контактных слоях сохраняет исходное фазовое состояние и претерпевает изменения только вследствие пластического деформирования.

Для получения более широких представлений о процессе стружкообразования при термофрикционном фрезоточении необходимо исследование корней стружек. Корни стружек являются прямым доказательством тех или иных процессов, происходящих в зоне стружкообразования и в контактной зоне. Исследования должны охватывать широкий диапазон скоростей резания, только тогда можно понять трансформацию механизмов и процессов в зоне резания с изменением температур и скоростей деформации и сделать надлежащие выводы.

Получение корней стружек происходило при получистовом точении стали 30ХГСА при подаче S = 30÷100 мм/мин; глубине резания t = 1,5÷2,5 мм; $n_{шп}$ = 2000 об/мин; v_u = 250 м/мин.

Известно [5,6,7], что основой образования сливной стружки является преимущественно простой сдвиг. Направление пластического сдвига определяется углом β_1, а направление текстуры – искажением зерен вследствие относительного сдвига, превращающим их из шарообразных в эллипсоидальные, а в плоском сечении – из кругов в эллипсы. На рисунке 5 показаны микрофотографии корней сливной стружки, полученные при резании стали 30ХГСА.

В нашем случае отдельные элементы корня сливной стружки деформированы в направлении, не совпадающем с положением плоскости скалывания, расположенной под углом β_1. Разрушение срезаемого слоя происходит по плоскости скалывания (см. рис. 5), а наибольшая пластическая деформация происходит в другом направлении, под углом к этой плоскости, под углом β_2. Идентичность элементных и сливных стружек в структурном отношении и наличие у тех и других двух углов β_1 и β_2 (см. рис. 5) и трех зон в отношении характера текстуры (см. рис. 4 и 5) заставляют думать, что характер образования тех и других стружек одинаков. К такому заключению приводят и соображения единства процесса резания, а также и то, что в ряде случаев одна и та же стружка включает в себя оба вида [5]: с одной стороны, она является элементной, с другой - сливной.



β_1- угол скалывания; β_2 – угол структурной линии; η- структурный угол

Рис. 5. Микрофотография корней сливной стружки при резании стали 30ХГСА

Увеличение подачи увеличивает степень деформации контактирующего слоя стружки с инструментом, следовательно, увеличивается количество тепла, выделенное вследствие пластической деформации и температура резания. Поэтому материал стружки, находящийся вблизи места контакта с инструментом и являющийся сырьем для нароста, размягчается, становится весьма пластичным. Нарост при этом не будет возникать, расти и хрупко разрушаться, а будет течь тонким слоем по передней поверхности инструмента в сторону противоположную её движению. Нарост на поверхности инструмента находится в пластичном состоянии и ведет себя как тестообразная масса. Так как процесс резания при термофрикционном фрезоточении осуществляется в сложных термодинамических условиях, тормозящее действие, оказываемое режущим инструментом, становится настолько большим,

что приводит к плотному присоединению части стружки к передней поверхности и образованию заторможенного слоя, что отчетливо видно на полученных фотографиях.

Из этого можно сделать следующий вывод: на участке пластического контакта поверхность стружки настолько плотно прижата к передней поверхности инструмента, что часть стружки перемещается не по инструменту, а по заторможенному слою, прикрывающему переднюю поверхность.

Известно, что заторможенный слой обычно образуется при резании пластических и вязких материалов [5,6]. В нашем случае основной причиной образования заторможенного слоя является отсутствие охлаждения при термофрикционном фрезоточении.

Также необходимо отметить, что в работе [4] было сделано предположение о том, что при термофрикционном фрезоточении появляется текущий слой, благодаря чему имеет место скольжение стружки по отношению к текущему застойному слою, который предохраняет поверхность фрикционной фрезы от износа.

Это явление определяет особенности термофрикционного фрезоточения как процесса. Для возникновения текущего слоя требуются определенные условия, из которых важнейшим и определяющим является надлежащая температура, концентрирующаяся в небольшом по размерам граничном слое.

На основании имеющихся данных [8] можно считать, что значение этой температуры колеблется в пределах значения температуры рекристаллизации обрабатываемого материала.

Выводы:

1. Установлено, что в процессе термофрикционного фрезоточения структурных превращений не происходит, а также материал в контактных слоях сохраняет исходное фазовое состояние и претерпевает изменения только вследствие пластического деформирования.

2. Выявлено, что отдельные элементы корня сливной стружки деформированы в направлении, не совпадающем с положением плоскости скалывания, расположенной под углом β_1.

3. Установлено что при термофрикционным фрезоточении отсутствует образование нароста, так как материал стружки, находящийся вблизи места контакта с инструментом и являющийся сырьем для нароста, размягчается, становится весьма пластичным и будет течь тонким слоем по передней поверхности инструмента в сторону, противоположную её движению.

4. Считаем, что основной причиной образования заторможенного слоя при обработке стали 30ХГСА, характерного для процесса резания пластических и вязких материалов, является отсутствие охлаждения при термофрикционном фрезоточении. Однако с учетом того, что процесс резания при термофрикционном фрезоточении осуществляется в сложных термодинамических условиях, для более подробного изучения процесса образования заторможенного слоя необходимо проведение дополнительных исследований.

Литература:

1. Кравченко Н.С., Пегашкин В.Ф. Анализ схем фрезерования. // Материалы международной научно-практической конференции. В 2 т. Т1. / ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. инст-т. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2015. – С.51-56.

2. Селиванов А.Н., Насад Т.Г., Торманов С.Я. Экспериментальные исследования стружкообразования при обработке титанового сплава марки ВТ 1-0 методом высокоскоростного окружного фрезерования // Вестник СГТУ. 2011. №2(56). Выпуск 2.- С.138-144.

3. Sherov K.T., Musayev.M.M. and other. Experimental study of turn-milling process using special friction mill made of steel HARDOX / Metallurgical and Mining Industry. Volume №11-2016 p.52-59.

4. Шеров К.Т., Мусаев М.М. Расчет коэффициента усадки стружки при обработке стали 30ХГСА фрезоточением / Механика и технологии. – Тараз: Изд-во «Тараз университеті» ТарГУ им. М.Х. Дулати, 2016.- №3- С.36-42.

5. Клушин М.И. Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя. Изд.2, перераб. Машгиз, 1970. 456 с.

6. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.

7. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А.Рыжкин, К.Г.Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. 411 с.

8. Кушназаров И.К., Шеров К.Т., Алтынбаев Р.Р. Технология термофрикционного фрезерования с высокочастотным охлаждением / Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ».- Харків, 2007.-Вип.2(15).- С.134-139.

Features of chip formation at thermofrictional milling

Sherov K.T.[1,a], Musaev M.M.[1,b]

[1]Karagandy State Technical University, B. Mira 56, Karaganda, Kazakhstan
[a]shkt1965@mail.ru, [b]kstu_mmm@mail.ru

Keywords: Thermal friction milling, chip formation, chip root, structural angle, braked layer, plastic deformation

In this paper, the results of the investigation of chip formation in the treatment of 30KhGSA steel with thermofrictional milling are presented. When studying the process of chip formation, a metallographic method of investigation was used. Investigated chips root zone, which is the most stressed zone, have the greatest pressure and intense heat formation. Samples of chips were also obtained for studying the texture. To improve the surface structure of the samples, they were pressed, grinded and electrodeposited. In order to have more detailed information on the processes occurring in the chip formation zone, a scheme for the formation of chips during thermofrictional milling was given. The results of the research showed that no structural transformations occur during the process of thermofrictional milling, and also the material in the contact layers retains the initial phase state and undergoes changes only due to plastic deformation.

УДК 51-72; 51-74; 621.039

Выбор программы для эмуляции физики резания

Попов В.Ю.

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия
berkutoff@rambler.ru

Ключевые слова: молекулярно-динамическое моделирование, научная программа, атомистическое моделирование, виртуальные атомы, моделирование материалов, эмуляция физики, Blender

При визуализации металлической системы, для совместного представления структуры и свойств моделируемого материала, необходимо использовать определённые пакеты научных и прикладных программ. Поскольку виртуальная среда существующих программ для визуализации молекулярного моделирования не идеально соответствует реальной (т.е. атомы в программах ведут себя не так, как атомы в реальности), то необходимо стремиться к наиболее полному соответствию 3D модели реальной физике. Динамика движений виртуальных атомов будет напрямую зависеть от справочных физико-технологических свойств моделируемых материалов, что позволит поднять такую форму физического эксперимента, как независимый моделирующий виртуальный эксперимент на более высокий уровень. В свою очередь, это позволит на атомном уровне максимально наглядно и достоверно моделировать сложные физические процессы с визуализацией их результатов и позволит эмулировать различные реальные физические эксперименты при компьютерном моделировании наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий.

Существует не так много пакетов научных и прикладных программ общего пользования, которые подходят для задачи эмуляции физики процесса резания[1] материалов. Самые известные из них:

– *AMBER* (Assisted Model Building with Energy Refinement), University of California, San Francisco, USA;

– *CHARMM* (Chemistry at Harvard Macromolecular Mechanics), Harvard University, Ivy League research university in Cambridge, Massachusetts, USA (рис. 1);

– *GROMACS* (GROningen MAchine for Chemical Simulations), Royal Institute of Technology and Uppsala University, Sweden;

– *GROMOS* (GROningen MOlecular Simulation), University of Groningen, Netherlands; HOOMD-blue, Glotzer Group, University of Michigan, USA (рис. 2);

– *Lammps* (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator), Sandia National Laboratories., U.S. Department of Energy's National Nuclear Security, New Mexico, USA (рис. 3);

– *NAMD* (Nanoscale Molecular Dynamics, formerly Not Another Molecular Dynamics Program), University of Illinois at Urbana-Champaign, USA (рис. 1);

– *OPLS* (Optimized Potentials for Liquid Simulations), Purdue University and Yale University, Connecticut, USA (рис. 4).

Качественный итог моделирования подразумевает не только грамотный выбор программы для визуализации, но и учет ограничений, свойственных этим программам, что необходимо для дальнейшего критического рассмотрения полученных результатов (рис. 4).

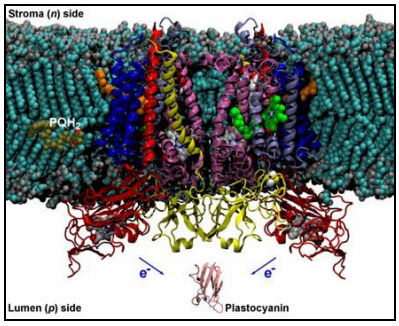


Рис. 1. Пример моделирования структуры цитохрома на суперкомпьютере RCAC, с использованием программы расчета силовых полей CHARMM 27 и NAMD 2.5
(Источник: https://www.physics.purdue.edu/~sergei/research-b6f-simulations.html)

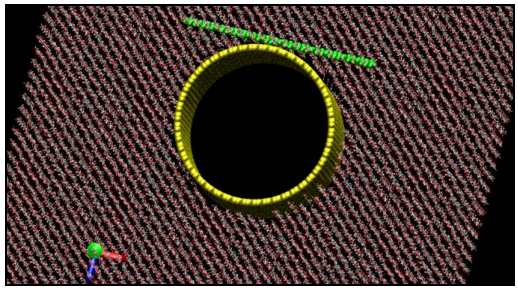


Рис. 2. Пример моделирования углеродных нанотрубок с использованием программы GROMACS
(Источник: http://chembytes.wikidot.com/grocnt)

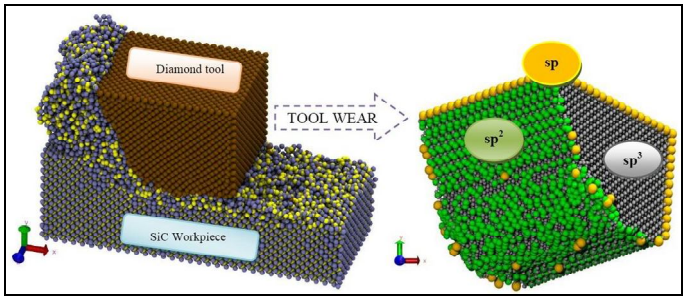


Рис. 3. Пример динамического моделирования износа алмазного инструмента при резании кубического карбида кремния с использованием программы Lammps
(*Источник: http://feazone.org/print.php?type=N&item_id=121)*

[1] *Эмуляция физики резания – это имитация законов движения и изменения структуры материи при отделении её поверхностных слоёв с образованием стружки, при которой имитирующее устройство воспринимает те же данные, выполняет ту же программу и достигает максимально точно того же результата, что и имитируемое.*

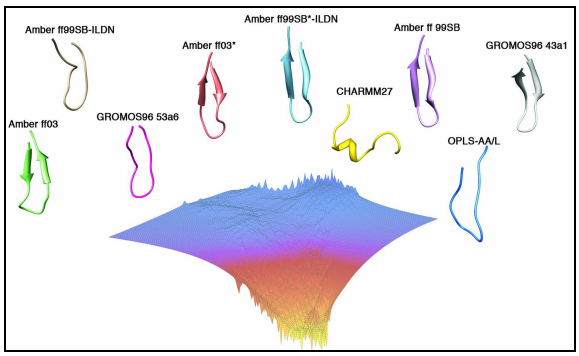


Рис. 4. Сравнительное тестирование программ Amber, GROMOS, CHARMM и OPLS с целью формирования вторичной структуры с использованием различных силовых полей, при одних и тех же начальных условиях. Как видно, вторичные структуры, показывающие финальные конфигурации после микросекунды взаимодействия полей явно отличаются в каждой из программ
(Источник: https://www.flickr.com/photos/softsimu/8100688099)

В качестве других примеров, более приближенных к интересующей нас машиностроительной тематике, можно привести несколько публикаций, находящихся в свободном доступе в ведущих зарубежных журналах. Например, в работе *«Atomistic simulations of nanoindentation»* (2006, Madison, Wisconsin, USA), рассматривается атомистическое моделирование взаимодействия между атомами золота и никеля, описывается процесс вдавливания и засаливания поверхности индентора (рис. 5).

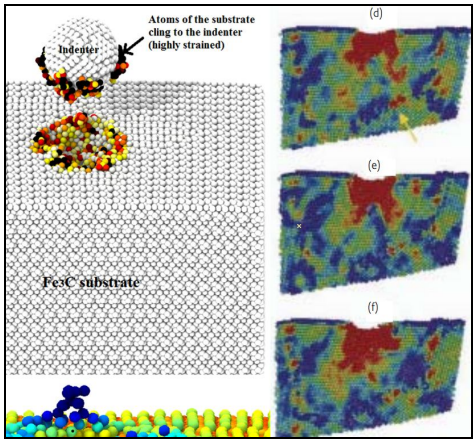


Рис. 5. Пример моделирования вдавливания индентора, показывающий распределение напряжений между дислокациями границ зерен *(Источник: http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71496-1)*

В работе «*Molecular dynamics modeling of nanoscale machining of silicon*» (2013, Port Elizabeth, Republic of South Africa), рассматривается взаимодействие между атомами кремния и аллотропной модификацией углерода в виде алмазного инструмента (рис. 6).

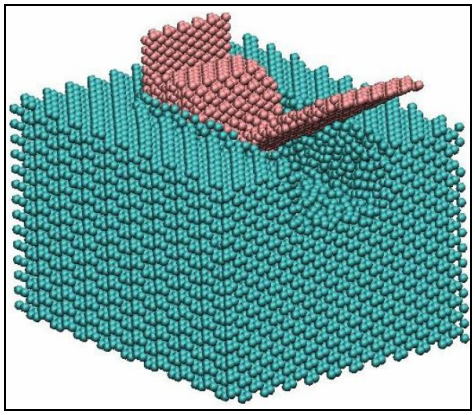


Рис. 6. Пример моделирования резания кремния *(Источник: doi:10.1016/j.procir.2013.06.141)*

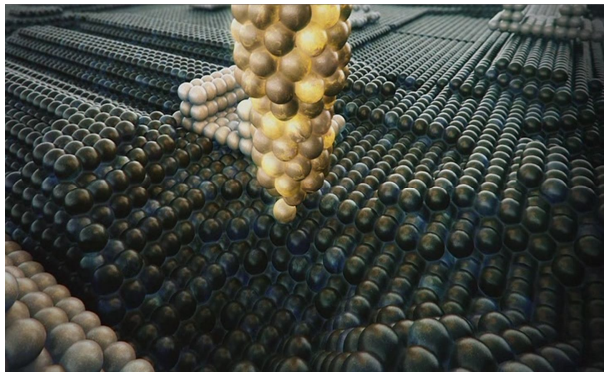


Рис. 7. Пример динамического моделирования процесса перемещения "иглой" одного атома

Следует также отметить документальный фильм «*Mysteries of the Unseen World*» (2013, National Geographic, USA), в котором были наглядно показаны явления, которые нельзя увидеть невооруженным глазом, явления, которые спрятаны от человеческого восприятия другими масштабами измерения времени и пространства (рис. 7). В частности, показана динамика перемещения одного атома в атомной структуре металла, которая, как показал наш анализ, не имеет ничего общего с реальностью.

Из числа российских *medical illustrator*[2] стоит отметить студию Visual Science Ивана Константинова, которой был создан научно достоверный экспонат аденовируса и находящийся теперь в Дарвиновском музее. Отметим их плакат, на котором показано строение атома на примере атома урана 238 (рис. 8), что дает возможность любому человеку получить наглядное и достоверное представление о том, как выглядят подобные объекты на микроуровне.

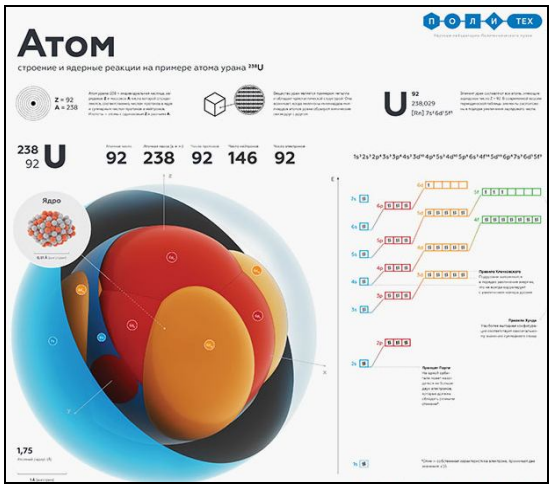


Рис. 8. Пример образовательного плаката для Научных лабораторий Политехнического музея в Москве *(Источник: http://visual-science.com/ru/projects/plakaty-politech/atom)*

Вышеупомянутые аналоги программ для моделирования, а также работы, выполненные с научно-исследовательской и документальной целью, либо не имеют в своем составе модуля визуализации динамической модели изучаемых процессов, либо с низкой степенью достоверности отражают действительную структуру металлов. Одни из программ нацелены на моделирование только биологических структур, либо геномов и не подходят для конструкторско-технологических, машиностроительных целей. Работа с ними в подавляющем большинстве случаев затруднена вычислениями, связанными с электрическими взаимодействиями в моделируемой системе, что в свою очередь требует использования мощных процессоров. Другим недостает наглядности и научно-теоретического уровня изложения материала.

Исходя из вышеизложенного, нами был сформулирован ряд требований [1–11] для выбора программного обеспечения, которое позволило бы исключить расчетную часть, но без искажения реальной динамики системы и с обязательным наличием удовлетворительной физики. При создании атомной 3D модели алмазного резания, как и при создании любой работы с помощью компьютерного моделирования, требуются системы трехмерного моделирования, которые могут обеспечить максимальную наглядность и точность соответствия

[2] *Medical illustrator – профессиональный художник с высшим образованием в двух областях – естественных наук и визуальной коммуникации. В тесном сотрудничестве с известными мировыми учеными, врачами и другими специалистами, медицинские иллюстраторы преобразуют сложную информацию в понятные для широкой аудитории визуальные образы.*

виртуальной модели реальной. При моделировании комбинированных процессов требуется учитывать многообразие систематических и случайных погрешностей, имеющих разную природу (механическую [12–14], физическую [15–20], электрическую [21, 22], электрохимическую [23–25] и т.д.). Поэтому программное обеспечение должно быть не только профессиональным, но и:

– включать в себя средства для создания трехмерной компьютерной графики, моделирования, анимации, с использованием современных методов рендеринга и постобработки видео;

– иметь широко настраиваемые параметры, возможность работы с библиотеками материалов, с использованием гибких инструментальных средств для адаптации к изменяющимся условиям моделирования;

– иметь возможность стабильной работы (в части моделирования и манипулирования) со сценами, содержащими более 1 миллиона частиц, при отсутствии у ПК высокой вычислительной мощности;

– иметь функцию *запекания*[3] анимации при дальнейшем рендере видео. От количества кадров зависит плавность изображения – чем меньше кадров, тем резче движение, и тем грубее будет показано взаимодействие алмазного зерна с материалом [26, 27], в связи с чем, необходимо подбирать приемлемое количество кадров.

Данным требованиям отвечает свободный проект с открытым исходным кодом – *Blender*, программный продукт для 3D анимации, моделирования, рендеринга и композитинга [1–7]. Однако наиболее важным при визуализации является не столько программа, сколько техническое знание и понимание физических процессов, протекающих при резании, грамотность выбора начальной конфигурации системы.

Литература:

1. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 137–149.
2. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187–191.
3. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 103–107.
4. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201–207.
5. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. Методика компьютерного моделирования процессов комбинированной электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2014. № 13. С. 91–96.
6. Хлыстов А.Н. Автоматизация молекулярно-динамического моделирования // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 255–259.
7. Хлыстов А.Н. Сложность МД-моделирования физических процессов // В сборнике: Молодая мысль: наука, технологии, инновации материалы VIII (XIV) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 284–288.
8. Khlystov A.N., Kirichenko O.P. Negative aspects of molecular dynamic simulation or atomic non-quantum physics // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 205–208.
9. Бондин А.В., Хлыстов А.Н. Молекулярно-динамическое моделирование в машиностроении // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 248–251.
10. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91–102.
11. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. "Ключевая" популярность электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 50–57.

[3] *К "запеканию" (от англ. bake) относят расчёт процессором ПК анимации движения частиц, объектов, физики и т.п. Итогом является моделируемая сцена, но уже в динамике, с наличием треклайна (полоски проматывания анимации), которую можно промотать, при необходимости внести изменения и только после этого применить к сцене рендеринг изображений.*

12. Попов В.Ю. Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 21–26.
13. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306–308.
14. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206–212.
15. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114–120.
16. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механики XXI веку. 2010. № 9. С. 101–104.
17. Кудряшов С.М., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Использование минеральных рассолов для устранения засаленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 109–118.
18. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799–800. С. 291–298.
19. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22–29.
20. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14–19.
21. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 129–135.
22. Янюшкин А.С., Лосев А.Б., Якимов С.А., Попов В.Ю. Роль температуры при затачивании инструментов алмазными кругами на металлической связке // Металлургия и машиностроение: ежеквартальный специализированный информационный бюллетень. 2006. № 1. С. 49–53.
23. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68–75.
24. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.
25. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116428, опубл. 10.11.2003.
26. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.
27. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

Selecting a program for simulation of cutting physics

Popov V.Y.

Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia.
berkutoff@rambler.ru

Keywords: molecular dynamics simulation, scientific program, atomistic modeling, virtual atoms, material modeling, physics simulation, Blender

When visualizing a metal system, to share the structure and properties of the material being modeled, it is necessary to use certain packages of scientific and applied programs. Since the virtual environment of existing programs for visualization of molecular modeling does not ideally correspond to the real (ie, atoms in programs behave differently than atoms in reality), it is necessary to strive for the most complete correspondence of the 3D model to real physics. The dynamics of the movements of virtual atoms will directly depend on the reference physico-technological properties of the materials being modeled, which will raise the form of the physical experiment, as an independent simulating virtual experiment to a higher level. In turn, this will make it possible to simulate the most complex and physically complex physical processes with visualization of their results at the atomic level and to emulate various real physical experiments in the computer simulation of nanomaterials, nanodevices and nanotechnologies.

УДК 621. 793/.795, УДК 629.9, УДК 629.083

Функционально-ориентированный подход к системе технологических воздействий при техническом обслуживании и ремонте транспортных средств

Михайлов А.Н.[1,a], Лукичев А.В.[1,b], Костенко А.В.[2,c], Сакно О.П.[3,d]

[1]Донецкий национальный технический университет, ул. Артема, 58, Донецк, ДНР
[2]Камчатский государственный технический университет, ул. Ключевская, 35, Петропавловск-Камчатский, Россия
[3]Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепропетровск, Украина
[a]mntk21@mail.ru, [b]a_lukichov@mail.ru, [c]andr13kost@list.ru, [d]sakno_olga@mail.ru

Ключевые слова: технологическое воздействие, поверхностный слой, техническое обслуживание, ремонт, функционально-ориентированные свойства

В статье рассмотрен функционально-ориентированный подход (ФОП) к обеспечению надежности транспортных средств (ТС) на базе технологических воздействий в рамках системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Обеспечение надежности деталей в течение всего жизненного цикла зависит от как качества изготовления, так и от качества системы ТОиР. Предложена функциональная структура ТОиР. Проанализированы ее базовые, технологические, методологические параметры, которые влияют на надежность. Установлено, что проведение анализа и синтеза статистических и экспериментальных данных по надежности отдельных элементов систем и подсистем ТС и составляющих системы ТОиР в едином информационном поле позволяет осуществлять управление их ресурсом и надежностью на основе синтеза функционально-ориентированных технологий (ФОТ). Синтез ФОТ на каждом этапе наполняется новым информационным содержанием и новыми элементами структуры и маршрута технологических воздействий. В результате иерархия ФОП развивается как функция времени и условий эксплуатации.

Постановка проблемы. Изменяющиеся в процессе эксплуатации параметры поверхностного слоя (ПС) существенно влияют на параметры надежности и эксплуатационные свойства деталей: износостойкость, усталостную прочность, коррозийную стойкость. Для обеспечения и сохранения заданного свойства ПС детали необходимо обеспечить характеристики поверхности, которые непосредственно влияют на необходимые свойства в процессе эксплуатации, и поддерживать эти характеристики на необходимом уровне в течение заданного срока службы.

Для этого создана и существует система ТОиР механизмов и машин. Особенно это важно для деталей ТС, так как возможности ТОиР существенно ограничены, как длительностью автономной эксплуатации, которая может составлять несколько месяцев, так и отсутствием необходимой структуры обслуживания в узловых точках маршрута, повышенными требованиями к надежности, где вероятность отказов должна приближаться к нулю. Детали, из которых состоят узлы, агрегаты и установки различных судов работают в самых разнообразных условиях. Конструктивные особенности деталей, качество их изготовления влияет на долговечность и надежность машин (оборудования, установок и систем транспортных средств). Поэтому учет условий эксплуатации деталей, даже их отдельных поверхностей, определяют их срок службы, причем внезапный отказ, зачастую, просто недопустим.

Обеспечить полностью функционально-ориентированные свойства (ФОС) деталей в процессе изготовления достаточно сложно, так как реальные условия эксплуатации могут существенно отличаться от заданных, необходима их коррекция в процессе ТОиР, в том числе восстановление их на новом уровне. То есть ФОП должен сопутствовать деталям ТС на протяжении всего жизненного изделия: от конструирования и изготовления, до исчерпания полного срока эксплуатации и утилизации.

Особенно важным учет диагностической и эксплуатационной информации, получаемой при проведении ТОиР, является для изделий, которые впервые запускаются в серийное

производство или уникальных. При этом данные о ФОС деталей и узлов, весьма ориентировочны, или полностью отсутствуют, и определяются среднестатистическими или аналоговыми методами, что может привести к существенным ошибкам при разработке технологии изготовления, а значит к снижению срока службы и повышенной склонностью к аварийным ситуациям.

Анализ последних исследований и публикаций. Актуальным направлением в формировании качества поверхности являются ФОТ. Требования к качеству выпускаемых машин непрерывно возрастают, а, значит, повышаются требования к эксплуатационным свойствам деталей. Например, до 80% случаев выхода из строя машин при эксплуатации происходит из-за износа в сопряжениях узлов трения; детали машин, работающие в активных средах, нередко выходят из строя из-за интенсивного их корродирования [1]. В связи с этим актуальны научные разработки технологий, обеспечивающие качество деталей пар трения, к рабочим поверхностям которых предъявляются высокие требования по прочности и износостойкости, создание новых технологических воздействий [2, 3, 4, 5, 6].

Анализ последних исследований и публикаций свидетельствует, что проблема повышения надежности ТС эффективности проведения ТОиР, с учетом реальных условий эксплуатации является актуальной. Вопросом исследования основных принципов обеспечения работоспособности ТС, на основе исследования их надежности, посвящены работы Аниловича В.Я., Говорущенко М.Я., Крагельского И.В., Кузнецова Е.С., Проникова А.С. и многих других авторов. Также они много внимания уделяли роли именно организации системы технической эксплуатации ТС в улучшении основных показателей надежности, а именно долговечности, безопасности, работоспособности.

Анализ исследований Репина С.В., Гриффа М.И., Канторера С.Е. показывает, что эффективность эксплуатации машин в значительной степени определяется уровнем их надежности, которая формируется на всех этапах жизненного цикла. Кроме снижения эффективности и производительности, недостаток надежности повышает техногенный риск (Болотин В.В., Половко А.М., Едельман В.И.), который характеризует достоверность отказов ТС, которые приводят к авариям, экономическим, экологическим и другим видам ущерба, и снижают в конечном итоге эффективность. Поэтому особенно важно управлять надежностью, ФОС именно на этапе эксплуатации, когда ТС реализует свое назначение, для чего также необходимо учитывать субъективные факторы и психофизиологическое состояние всего персонала, связанного с выполнением транспортной работы и проведением ТОиР [7, 8].

Цель статьи - усовершенствование комплексного ФОП к обеспечению надежности ТС на всех этапах его жизненного цикла, на основании системного анализа составляющих, которые влияют на ФОС и показатели надежности и реализуются в процессе ТОиР.

Материалы и результаты исследования. Поскольку, эксплуатационные свойства деталей напрямую зависят от технологии обработки деталей, то поиск новых или усовершенствование уже известных технологий изготовления деталей является актуальной задачей, требующей соответствующих научных изысканий.

Суслов А.Г. отмечает, что процесс эксплуатации детали можно рассматривать как продолжение технологии ее обработки. Развивая эту мысль, можно сказать, что процесс эксплуатации также является продолжением технологических воздействий при ТОиР. При этом разрабатывать эти воздействия необходимо, используя ФОП.

Функционально-ориентированные технологии [3] относятся к новому классу технологий, обеспечивающих при изготовлении качественно новую совокупность свойств изделий. Они позволяют полностью адаптировать изделия при изготовлении к особенностям их эксплуатации в машине или технологической системе, а также обеспечить заданный, требуемый или предельный их эксплуатационный потенциал.

Основная идея создания ФОТ базируется на следующих положениях: а) в технологии машиностроения при составлении технологического процесса принято каждое изделие разбивать на исполнительные поверхности, и технологический процесс проектировать, основываясь на определенной последовательности обеспечения свойств этих исполнительных по-

верхностей; б) между свойствами каждого функционального элемента изделия, особенностями его эксплуатации в машине и технологическими воздействиями средств обработки на функциональный элемент должны существовать определенные связи, которые в ФОТ определяются и формируются на базе ряда принципов; в) реализацию технологических воздействий на каждый функциональный элемент изделия необходимо выполнять прецизионно, особо или супер прецизионно на местном уровне, производить из условия обеспечения изменения его свойств в пространстве и во времени в зависимости от особенностей эксплуатации каждого функционального элемента изделия в машине или технологической системе.

Реализуя эти положения применительно к технологическим воздействиям в процессе ТОиР необходимо к 3-м основным этапам синтеза ФОТ (рис. 1) добавить уровень, постоянно осуществляемый на этапе эксплуатации, при функционировании системы ТОиР.

Рис. 1. Основные этапы синтеза функционально-ориентированных технологических процессов

При этом новым содержанием наполняется каждый из указанных этапов:

- на основе диагностических и контрольных операций при ТО формируется база данных о эксплуатационных особенностях изделия, дополняется составленная *apriory* на этапе изготовления структура эксплуатационных функций, при этом указанная база остается открытой, обновляемой, пополняемой при дальнейшей эксплуатации изделия, и за счет обратной связи влияющей на базовые ФОТ изготовления;

- процессы изнашивания, изменения формы, выявления слабых мест позволяют уточнить матрицу структуры функциональных элементов по уровням «глубины технологий», классифицировать эти уровни на новой информационной базе;

- вновь формируемые технологические воздействия при ТОиР базируются на нормативных возможностях, заложенных изначально, но при выявлении существенных отклонений от реализации функций, повышенном износе, сокращение жизненного цикла, может включить применение ФОТ, как восстанавливающих работоспособность на основе исходных технологий, так и полное изменение ФОТ, реализуемое как при ремонте и восстановлении деталей изделия, так в дальнейшем изменяющем базовые ФОТ.

Таким образом, ФОП к реализации технологических воздействий при ТОиР создают постоянно развивающуюся и обновляемую систему, позволяющую непрерывно совершенствовать: технологию обслуживания и ремонта; технологию изготовления нового поколения изделий; конструктивные решения элементов ТС.

Для исследования систем, которые находятся во множестве технических состояний, использования только классических методов теории надежности в системе ТОиР представляет существенные трудности. Ограниченность традиционных методов расчета надежности заключается также и в том, что эти методы детально разработаны лишь для экспоненциального распределения наработки на отказ и времени возобновления; задание резервирования также решается комплексно.

Перечисленные выше проблемы можно устранить, если для исследования надежности всех элементов ТС и системы ТОиР использовать метод имитационного (статистического)

моделирования. Основные идеи этого метода для исследования надежности сложных систем изложенные в [9].

Адаптируя идеи метода к надежности ТС и системы ТОиР, определяем, что целью деятельности по повышению технической готовности ТС является результат, а именно – повышение основных показателей надежности за счет совершенствования технологических воздействий при ТОиР на базе ФОП. Чтобы получить необходимый результат, надо создать определенную совокупность факторов. К этим факторам относятся:

- процессы, которые осуществляются для получения результата;
- методы получения результата;
- средства, необходимые для реализации этих процессов;
- ресурсы, которые тратятся на получение результата;
- условия, в которых получен результат;
- взаимосвязи между ресурсами, условиями, средствами и процессами, которые обеспечивают целеустремленную деятельность и необходимое качество результата – комплексное повышение надежности самих изделий, так и системы ТОиР. Эта система показана на рис. 2 в упрощенном виде и представляет единство входных, технологических и методологических параметров.

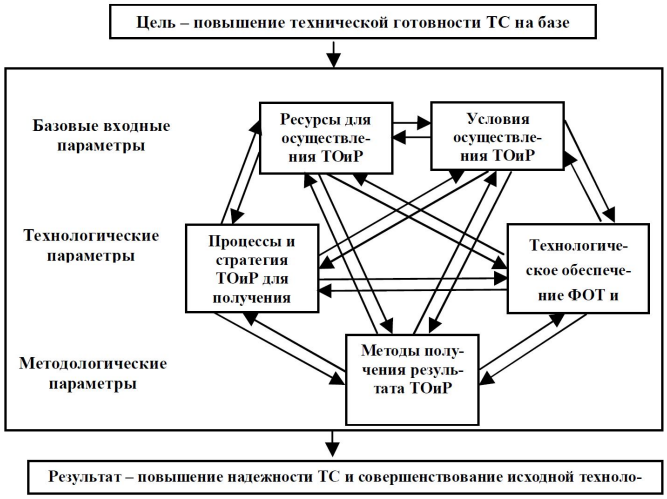


Рис. 2. Структура получения повышенной надежности ТС и технологии их изготовления, ТОиР

На основе анализа состояния вопроса наполняется множества этой системы необходимыми для ТОиР элементами, а именно:

1. Условия ТОиР, разделяемые на естественные (неуправляемые) и искусственные (управляемые), которые создаются человеком и включают:

- условия реализации системы ТОиР (нагрузка, необходимый уровень надежности, временные ограничения, технологические режимы и др.);
- условия эксплуатации оборудования системы ТОиР (наличие специализации обслуживания, условия хранения и транспортировки, качество метрологической техники, соблюдения мер безопасности и др.);
- обеспеченность кадрами, техническими средствами, условия труда персонала и т.п.

Каждый фактор имеет большое количество реализаций, которое создает множественное число. Связки между факторами образуют сложное множественное число связей. Влияние фактических эксплуатационных условий на базе ФОП на эффективность ТОиР оценивают, как правило, на основании статистических данных путем вычисления коэффициентов влияния для каждого фактора.

2. Ресурсы ТОиР, которые можно разделить на ряд классов ресурсов (как объективных, так и субъективных):

- информационные ресурсы (банки данных, документация, системы знаний и др.;
- финансовые ресурсы;

- ресурсы времени;
- пространственные ресурсы - это площади и объемы для реализации процессов;
- энергетические ресурсы образуют разные источники (атомные, ветровые, электрические, солнечные, горюче-смазочные, мускульная энергия и др.);
- кадровые ресурсы, состоящие из исполнителей и руководителей;
- материальные ресурсы, к которым относится элементная база, природные ресурсы, всевозможные вещества и др., которые обеспечиваются отделами материально-технического снабжения;
- наукоемкая информация, системный подход, обеспечивающий совершенствование ФОП.

3. Процессы ТОиР – множества технологических воздействий, включающие процессы обеспечения работоспособности, которые разделяют на процедуры (обслуживание, включая ежедневное, ремонт, диагностика) и операции (поиск неисправностей, их устранение, плановые регламентные работы, замена узлов, восстановление свойств, заказ запасных частей и т.д.). Сочетание процедур на базе ФОП определяет стратегию ТОиР, реализуемую непрерывно в течение всего срока эксплуатации.

4. Средства ТОиР – множества, включающие технические средства (ремонтное и технологическое оборудование, инструменты, стенды, промышленные здания и др).

5. Методы ТОиР включают разработанные технологии выполнения операций, пути и направления их совершенствования в направлении ФОТ, их наполненность, а совокупность стратегий и методов деятельности в этом направлении можно считать методологией ТОиР для обеспечения надежности.

Связи между элементами множеств системы, реализующие ФОП, превращают набор отдельных элементов проектирования, конструирования, производства, ТОиР в единую систему обеспечения жизненного цикла изделий. Характер связей определяется теми отношениями, в которые вступают между собой факторы. Огромное количество элементов во множествах системы производства и ТОиР делает множества связей настолько большим и разнообразным, что задание организации связей между факторами является одной из самых сложных задач в методологии.

Реализация предложенного комплексного подхода нуждается в создании единой базы статистических, эксплуатационных, диагностических данных, которая должна существовать в общем информационном пространстве и быть основой для принятия решений и управления процессами, которые непосредственно влияют на надежность ТС. Кроме того обязательно необходимо в этом же информационном пространстве рассматривать психологические факторы, которые связаны с человеческим фактором (механики, водители, эксплуатационщики, работники технической службы, диспетчеры, руководители). Чтобы система ТОиР стала работающим инструментом, механизмом получения необходимого результата, нужно с помощью установленных связей разрабатывать порядок взаимодействия элементов приведенных множеств.

Вывод. Комплексный функционально-ориентированный подход к обеспечению надежности ТС на всех этапах их жизненного цикла, позволяет за счет анализа и синтеза статистических и экспериментальных данных по надежности отдельных элементов систем и подсистем ТС и составляющих системы ТОиР в едином информационном поле, позволяет управлять их ресурсом и надежностью за счет осуществления необходимых технологических воздействий, разработанных на базе синтеза ФОТ и совершенствования технологических процессов изготовления.

Литература:

1. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.

2. Михайлов А.Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2005 г., 12-17 сентября: в 5 т. – Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – С. 261-275.

3. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / Михайлов А.Н. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

4. Михайлов А.Н. Особенности синтеза комбинированных и гибридных функционально-ориентированных макро-, микро- и нанотехнологий // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2010 г., 13-18 сентября: в 5 т. – Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2010. – С. 189-209.

5. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

6. Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Лукичев А.В. Технологическое обеспечение звукорезонансной отделочной обработки в квазиупругой среде // Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции [Машиностроение и техносфера]. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 88-93.

7. Игнатов В.И. Научные основы формирования стратегии технического обслуживания и ремонта лесных машин. – М.: МГУЛ, 2000. – 336 с.

8. Репин С.В. Методология совершенствования системы технической эксплуатации строительных машин. – Дисс. доктора техн. наук – Санкт-Петербург, 2008. – 451 с.

Function-specific approach to the system of technological actions at maintenance and repair of vehicles

Mikhaylov A.N.[1], Lukichov A.V.[1], Kostenko A.V.[2,c], Sakno O.P.[3,d]

[1]Donetsk national technical university, Artema Str., 58, Donetsk, DPR
[2]Kamchatka state technical university, Klyuchevska Str., 35, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia
[3]Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky Str., 24A, Dnepropetrovsk, Ukraine
[a]mntk21@mail.ru, [b]a_lukichov@mail.ru, [c]andr13kost@list.ru, [d]sakno_olga@mail.ru

Keywords: technological action, superficial layer, maintenance, repair, functional-oriented properties

Functional-oriented approach (FOA) to reliability control of vehicles of transport systems (TS) on the base of technological actions within the framework of the technical service and repair (TSaR) is considered in the article. Providing of reliability of details during all life cycle depends on both qualities of making and from quality of the system of TSaR. The functional structure of the TSaR is proposed. The basic, technological, methodological characteristics of this structure are analyzed, it affects reliability. It is established that carrying out analysis and synthesis of statistical and experimental data on reliability of individual elements of the systems and subsystems of vehicles and constituent system of the maintenance system and repair in the single information field enables to exercise administration their service life and reliability on the basis of synthesis of the functional-oriented technologies (FOT). The synthesis of FOT on every stage is filled with new informative maintenance and new elements of structure and route of technological actions. As a result the hierarchy of FOA develops as a function of time and external environments.

УДК 621.454

Влияние технологических факторов на параметры шероховатости поверхности при обработке абразивными инструментами

Богуцкий Б.В.[a], Дзюбаба Р.Н.[b], Новоселов Ю.К.[c]

Севастопольский государственный университет, Университетская 33, Севастополь, Россия
[a]bogutskibv@yandex.ru, [b]romanenkorn94@mail.ru, [c]sev.novoseloff@yandex.ru

Ключевые слова: абразивная обработка, шероховатость поверхности, теоретико-вероятностный подход, методика прогнозирования шероховатости

В статье, на основе использования современного математического аппарата теории вероятностей, выполнен анализ влияния технологических факторов на параметры шероховатости поверхности при обработке заготовок абразивными инструментами. Показано, что при обработке абразивными инструментами формирование микрорельефа поверхности непосредственно связано с закономерностями удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом. Основными параметрами зоны контакта являются ее размеры и параметры процессов удаления материала, которые характеризуются вероятностями удаления и не удаления материала. Полученные зависимости учитывают параметры состояния рабочей поверхности инструмента и могут быть использованы для расчета основных параметров шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании. Выполнена оценка влияния технологических факторов на шероховатость поверхности обрабатываемой заготовки позволяющая выбрать наиболее значимые, изменения которых необходимо учесть при проектировании шлифовальных операций.

При проектировании операции обработки деталей абразивными инструментами на автоматизированном оборудовании необходимо иметь информацию о влиянии технологических факторов на параметры шероховатости обрабатываемых поверхностей. Из литературных данных известно, что на шероховатость существенное влияние оказывают режим резания, состояние заготовки, оборудования, рабочей поверхности инструмента. Так при круглом наружном шлифовании за период работы инструмента от его установки до полного износа шероховатость поверхности изменяется в 1,5…2,0 раза. Для эффективного управления процессом обработки в этих условиях на стадии подготовки управляющих программ нужна априорная информация. Это позволяет обеспечить высокую производительность и стабильность технологической операции. Особенно актуален этот вопрос при проектировании операций чистового и тонкого шлифования, которыми часто заканчиваются технологические процессы [7, 2].

Рассматриваемая задача является многопараметрической и может быть решена при применении современных теоретико-вероятностных моделей процесса взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности. Модели обладают достаточно высокой адекватностью, позволяют учесть при проектировании большое число технологических факторов [6, 2, 8]. Они являются основой для создания методик, алгоритмов и программ и могут включаться в современные системы автоматизированного проектирования.

Целью статьи является выполнить анализ влияния технологических факторов на параметры шероховатости поверхности при обработке заготовок абразивными инструментами, разработать рекомендации по включению наиболее значимых в современные системы проектирования.

Микрорельеф шлифованной поверхности представляет собой совокупность отображений в материале заготовки поверхностей резания, образованных при движении режущих кромок инструмента в пространстве обрабатываемой заготовки. Форма единичных рисок будет определяться формой режущих кромок, особенностями контакта с материалом поверхности. Для каждого отдельного абразивного зерна практически невозможно предсказать, како-

ва будет форма единичного среза, и оценить все возможные варианты среза. В тоже время с позиции теории вероятностей и случайных процессов могут быть определены статистические оценки для параметров шероховатости шлифовальной поверхности.

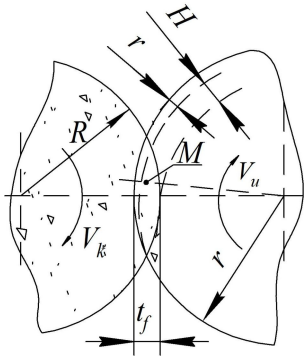


Рис.1. Схема процесса круглого наружного шлифования

При обработке абразивными инструментами формирование микрорельефа поверхности непосредственно связано с закономерностями удаления материала в зоне контакта заготовки с инструментом. Основными параметрами зоны являются ее размеры и параметры процессов удаления материала. Последние характеризуются вероятностями удаления и не удаления материала. Так для круглого наружного шлифования при выходе из зоны радиус-вектор участка поверхности заготовки уменьшается, рис.1, на величину радиального съема материала Δr, на поверхности остается слой шероховатости H, причем их сумма равна глубине микро резания t_f. Все три параметра взаимосвязаны и определяются при известных режимах резания и состояния рабочей поверхности инструмента.

Глубина микрорезания для рассматриваемого процесса вычисляется на основе решения уравнения баланса перемещения в технологической системе, которое имеет вид [3]

$$\Delta A_{s\ j} = \Delta t_{f\ j} + \Delta R_j + \Delta r_{j-1} + \sum_{k=1}^{n} \Delta y_{yjk} + \sum_{k=1}^{m} \Delta y_{qjk}\ , \qquad (1)$$

где ΔA_{sj}, $\Delta y_{yjk,}$ $\Delta y_{qjk,}$ – соответственно, изменения межцентрового расстояния вследствие наличия подачи, упругих и температурных деформаций за время от совмещения радиус-вектора рассматриваемого участка поверхности заготовки с плоскостью, проходящей через центра вращения круга и заготовки (основная плоскость) при j-1–м и j–м контактах; ΔR_j – радиальный износ инструмента в ранее принятые интервалы времени; Δr_{j-1} - радиальный съем материала; $\sum_{k=1}^{n} \Delta y_{yjk}$ и $\sum_{k=1}^{m} \Delta y_{qjk}$ – суммы приращений упругих и температурных деформаций элементов технологической системы; Δt_{fj} – изменение глубины микрорезания при j – м контакте. Знак плюс присваивается, если приращение уменьшает глубину резания и знак минус – если увеличивает.

Анализ уравнения (1) показывает, что для прогнозирования пространственного положения элементов технологической системы необходимо иметь сведения о параметрах качества заготовки, исходного профиля инструмента и аналитические модели, определяющие связь с технологическими факторами глубины микрорезания, радиального съема материала, износа круга, сил резания, упругих и температурных деформаций. Такие модели и примеры решения уравнения баланса методом итераций приведены в работе [3].

Для установившегося процесса приращения упругих, температурных деформаций и глубины резания равны нулю и уравнение (1) значительно упрощается

$$\Delta A_{s\ j} = \Delta R_j + \Delta r_{j-1}\,. \qquad (2)$$

При решении уравнения (2) можно воспользоваться экспериментальными данными по коэффициенту шлифования K_s, определяемого отношением объема удаленного материала к объему израсходованного инструмента [1]. При шлифовании стальных деталей кругами на керамической связке K_s равен 15…20, а соотношение $\Delta R/\Delta r$ при диаметре круга 300 мм и за-

готовки - 50 мм соответственно равно $\Delta R/\Delta r=r/RK_s=0.008...0.011$. Конкретные значения коэффициента K_s для типовых операций можно найти в справочной литературе [1, 4, 6].

При известном значении Δr глубина резания t_f вычисляется [3]

$$t_f = 0{,}739\Delta r + \sqrt{0{,}546(\Delta r)^2 + \frac{13{,}66V_u\Delta r}{K_s(V_k \pm V_u)n_g\sqrt{D_e\rho_g}}}; \quad (3)$$

где V_k, V_u – скорость круга и заготовки соответственно; ρ_g – радиус закругления при вершине зерна [5]; K_s – коэффициент стружкообразования; n_g – число абразивных зерен на единице рабочей поверхности круга; D_e – эквивалентный диаметр, $D_e=Dd/(D+d)$; где D, d - соответственно диаметр круга и заготовки.

При известной глубине микрорезания определяется величина слоя шероховатости поверхности

$$H = t_f - \Delta r. \quad (4)$$

При известных значениях Δr и t_f среднее арифметическое отклонение микро профиля R_a, наибольшая высота неровностей профиля R_{max} и высота неровностей профиля по десяти точкам R_z вычисляются:

$$R_a = \frac{\sqrt{2}V_u H_u^{3/2}}{\pi^2 K_s(V_k \pm V_u)n_g\sqrt{D_e\rho_g}\sum_{i=0}^{n}(W_m - i\Delta r)^{3/2}}; \text{ при } \Delta r < W_m \quad (5)$$

------ -

$$R_a = \frac{0{,}25V_u^{0,4}t_f^{0,6}}{K_s^{0,4}(V_k \pm V_u)^{0,4}n_g^{0,4}D_e^{0,2}\rho_g^{0,2}} \qquad \text{при } \Delta r \geq W_m. \quad (6)$$

$$M[R_{\max}] = H - 2\sqrt{\frac{2V_u t_f^{3/2}}{3n_g(V_k \pm V_u)L\sqrt{D_e}}}; \quad (7)$$

$$M[R_z] = H - 2{,}95\sqrt{\frac{V_u t_f^{3/2}}{n_g(V_k \pm V_u)L\sqrt{D_e}}}. \quad (8)$$

где W_m – расстояние до средней линии профиля после контакта от нижней границы слоя шероховатости; H_u - глубина рабочего слоя инструмента, в пределах которой рассчитывается число абразивных зерен.

Рассмотрим пример аналитического расчета высотных параметров шероховатости поверхности для процесса круглого наружного шлифования образцов из стали 9Х2 диаметром 50 мм кругами 1 300х40х127 24А F60 L 4V. При расчетах принято: K_s=0,9; V_k =35 м/с; V_u=0,25 м/с; n_g=5,2 1/мм^2; поперечной подаче ΔA_s=3,33 мкм за один оборот заготовки; ρ_g=0,021 мм, значение базовой длины L=0,8 мм. Все расчеты выполнены с соблюдением размерностей, рекомендованных системой СИ. Например, число абразивных зерен на единице рабочей поверхности инструмента принимается равным $5{,}2\cdot10^6$ 1/м^2, радиус закругления при вершине зерна - $21\cdot10^{-6}$ м. Для рассматриваемых условий Δr=3,3 мкм/оборот, t_f=11,5 мкм.

$$R_a = \frac{\sqrt{2}\cdot 0{,}262\cdot(11{,}5\cdot10^{-6})^{3/2}}{0{,}9\cdot 3{,}14^2\cdot 35{,}26\cdot 5{,}2\cdot10^6\cdot[(4{,}1\cdot10^{-6})^{3/2}+(0{,}8\cdot10^{-6})^{3/2}]\sqrt{\frac{0{,}3\cdot0{,}05\cdot21\cdot10^{-6}}{0{,}3+0{,}05}}} = 1\cdot10^{-6}\ м$$

Предложенные зависимости позволяют оценить влияние технологических факторов на параметры шероховатости поверхности и выбрать наиболее значимые, изменение которых необходимо учесть при проектировании операций. Графическая интерпретация уравнений (6), (7), (8) показана на рис.2.

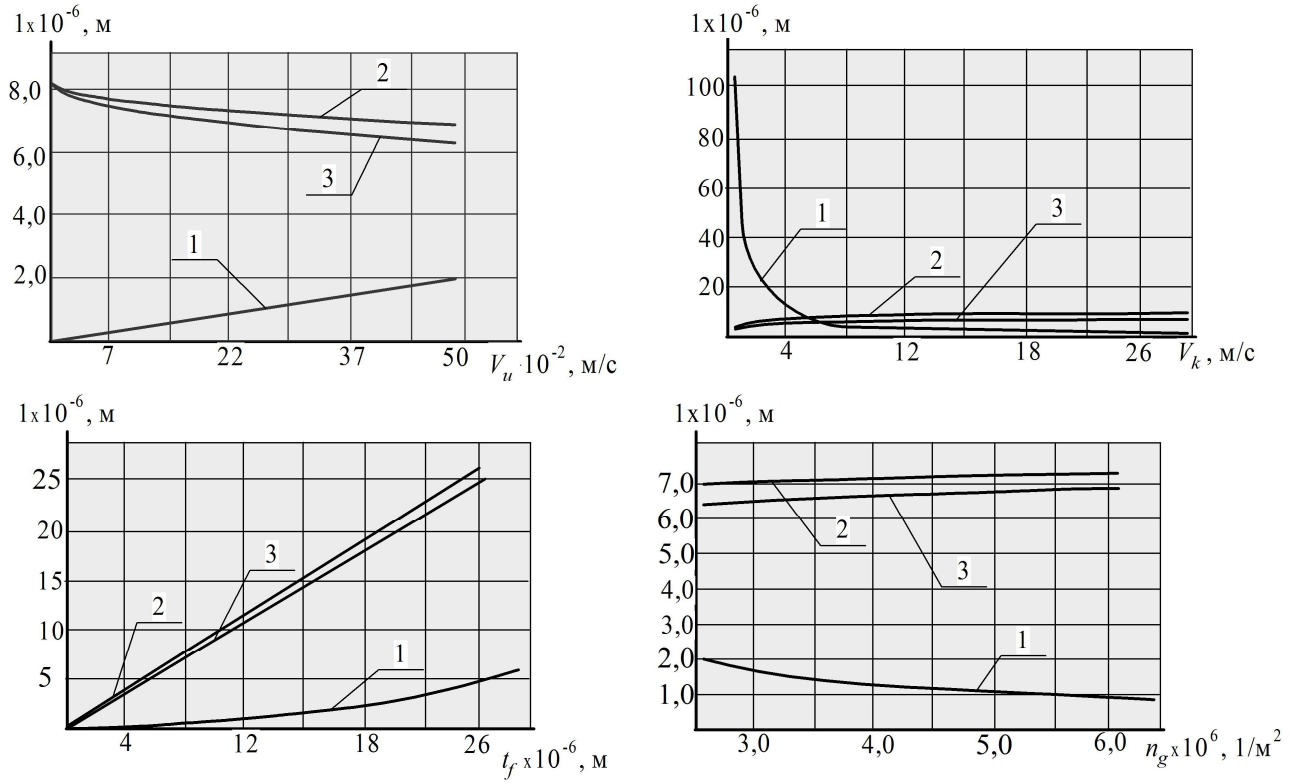


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости от технологических факторов:
1 – Ra, 2 – $Rmax$, 3 – Rz

Анализ графиков позволяет сделать выводы о схожести влияния технологических факторов на параметры R_{max} и R_z. При снижении V_u и увеличении V_k, n_g, t_f происходит увеличение значения шероховатости. Зависимости R_a имеют другой характер – при уменьшении V_k, n_g и увеличении значений V_u , t_f значение R_a возрастает.

Особенностью рассмотренных уравнений является то, что при расчетах учитываются не только параметры режимов резания, но и параметры состояния рабочей поверхности инструмента. Приведенные зависимости позволяют также оценить влияние многопроходности процесса на параметры шероховатости.

Зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхности приведены для процесса круглого наружного шлифования, но аналогичные зависимости могут быть получены и для других операций обработки деталей абразивными инструментами, например при внутреннем, торцевом или плоском шлифовании.

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

− полученные зависимости учитывают параметры состояния рабочей поверхности инструмента и могут быть использованы для расчета основных параметров шероховатости поверхности при круглом наружном шлифовании;

− выполненная оценка влияния технологических факторов на шероховатость поверхности обрабатываемой заготовки позволяет выбрать наиболее значимые, изменения которых необходимо учесть при проектировании шлифовальных операций.

Литература:

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник. Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

2. Новоселов Ю.К., Красный А.М. Вычисление некоторых параметров шероховатости шлифованных поверхностей // Технология и автоматизация машиностроения. 1977. – Вып. 20. – Киев. – С. 54–59.

3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке.: Изд-во: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 317 с.

4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Ч.3. – М.: Центральное бюро нормативов по труду, 1978. – 360 с.

5. Худобин Л.В. Анализ геометрии абразивного зерна // Ульяновский политехн. ин-т: сб. науч. тр. 1966. – Вып. 1. – Ульяновск. – С.6–20.

6. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.

7. Витенберг Ю.Р. Применение корреляционной теории для оценки шлифованной поверхности // Вестник машиностроения. – Вып. 1. 1969. – С. 55–57.

8. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности абразивного инструмента. – Саратов: Из-во Сарат. Ун-та, 1987. – 158 с.

The influence of technological factors on the parameters of surface roughness when working with abrasive tools

Bogutsky B.V.[1a], Dzyubaba R.N.[1b], Novoselov Y.K.[1c]

[1]Sevastopol State University, University st., 33, Sevastopol, 222053, Russian Federation
[a]bogutskibv@yandex.ru, [b]sev.novoseloff@yandex.ru, [c]romanenkorn94@mail.ru

Keywords: abrasive treatment, surface roughness, theoretical-probabilistic approach, methodology of roughness prediction

In the article, based on the use of the modern mathematical apparatus of the theory of probability, an analysis of the influence of technological factors on the parameters of the surface roughness during the machining of workpieces with the abrasive tools. It is shown that when processing with abrasive tools, the formation of surface microrelief is directly related to the mechanism of material removal in the area of contact between the workpiece and the tool. The main parameters of the contact zone are its dimensions and parameters of the material removal processes, which are characterized by the probabilities of removal or non-removal of the material. The obtained dependences take into account the parameters of the state of the working surface of the tool and can be used to calculate the basic parameters of the surface roughness in round external grinding. The made estimation of the influence of technological factors on the roughness of the surface of the workpiece being processed allows for the selection of the most significant ones, the changes of which must be taken into account when designing grinding operations.

УДК 51-72; 51-74; 621.039

Базовые методы компьютерной анимации в машиностроении

Бондин А.В.

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия
darktony94@gmail.com

Ключевые слова: молекулярно-динамическое моделирование, кристаллическая решётка, частицы, атомный радиус, Blender, программный код, адаптивность

Уникальность компьютерной анимации, основанной на методах молекулярной динамики, заключается в возможности её применения для моделирования как статических, так и динамических, скоротечных событий, в которых преобладают процессы невозможные для наблюдения никакими иными инструментальными средствами. Эти методы используют при описании диффузионных процессов в примесях и сплавах, описании всевозможных дефектов кристаллического строения материалов, а также фазовых превращений в твердом веществе под воздействием факторов высокой температуры и давления. Анализ полученных при МД-моделировании данных дает ясную картину о механизмах изменений в составе и структуре материалов на атомистическом уровне, предоставляет способность обеспечить информацией о динамике исследуемой системы или событиях, которые происходят в течение нескольких пикосекунд, например, при атомных столкновениях "кластер-поверхность" или росте защитных пленок.

Введение. В настоящее время в России существует не так много работ, посвященных визуализации физических процессов методами МД [1, 2]. Однако, за редким исключением [3–9], практически нет работ в области машиностроения, связанных с атомным моделированием структуры материалов либо после, либо во время процесса резания. В первую очередь это связано с ограниченными вычислительными мощностями тех персональных компьютеров, которые доступны большинству исследователей. Для решения актуальных задач, например, в области материаловедения, синтеза алмазов [10, 11] при разработке новых композиционных [12–15] и труднообрабатываемых материалов [16–21], для предсказательного моделирования их свойств [22–24], необходимо производить молекулярное моделирование на высоких мощностях современных суперкомпьютеров. Поэтому вопросы о возможности атомистического моделирования статической структуры материалов [1], моделирования процесса их резания [25–30], т.е. компьютерная визуализация анимированных поверхностей на атомном уровне, нашедшая отражение в компьютерной 3D-графике и видео, еще долгое время будут весьма актуальны. Исследование данных структур осуществляется при ювенильном контакте (шлифовании) [31–34], возникающим при комбинированной электроалмазной обработке [35, 36]. Одним из несомненных достоинств данной обработки является несложная модернизация существующего заточного оборудования под электрохимические процессы [37–46].

Базовые методы в анимации. Стоит отметить, что методы компьютерной анимации разделяют на методы, основанные на процедурной анимации, и методы, основанные на использовании ключевых кадров.

Процедурная анимация. В этом виде анимации движение алгоритмически описывается списком преобразований (перемещение, поворот и т.д.). Каждое преобразование определяется параметрами (такими как угол поворота). Эти параметры могут изменяться в процессе анимации согласно законам физики.

Типичный пример анимационной последовательности [47]:

```
CreateCLOCK(…);
For FRAME:=1 to NB_FRAMES;
TIME:= TIME + 1/24;
ANGLE:= A * SIN(OMEGA*TIME + PHI);
MODIFY(CLOCK,ANGLE);
draw CLOCK;
record CLOCK;
erase CLOCK.
```

Анимация, основанная на использовании ключевых кадров. Задание анимации объектов во многих ранних компьютерных анимационных системах было основано на задании значений переменных, связанных с этими объектами, на некоторых кадрах (называемых ключевыми), и автоматизированном расчете значений этих переменных в остальных кадрах. Вышеупомянутые переменные могут отражать в себе координаты положения или углы ориентации объекта, степень прозрачности грани объекта и т.д. Эти переменные в литературе часто называют сочлененными переменными [48].

Интерполяция. В кадрах, которые не являются ключевыми, значения интересующих параметров получают, интерполируя значения в ключевых кадрах. При этом, основываясь на особенностях конкретной решаемой задачи, рассматривают следующие моменты [49].

1) Выбирают между интерполяцией и аппроксимацией. Если задано множество точек, описывающих кривую, важно вначале определить, представляют ли заданные в ключевых кадрах значения точки, через которые кривая должна пройти, или они используются для управления формой кривой и не являются точными значениями. В первом случае часто используют сплайны Эрмита и сплайны Кэтмула-Рома. Во втором – кривые Безье и Б-сплайны (рис. 1).

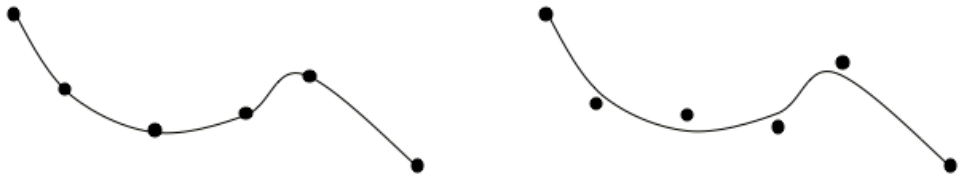


Рис. 1. Интерполяция (слева) и аппроксимация (справа)

2) Сложность. Напрямую зависит от выбранного интерполирующего уравнения – чем оно проще, тем быстрее вычислить значение интерполирующей функции, заданной этим уравнением.

3) Непрерывность. Выбор интерполирующего или уравнения в зависимости от необходимой гладкости кривой.

4) Глобальное или локальное управление. Определение метода интерполирования в зависимости от нужд пользователя при редактировании значений кривой в ключевых кадрах – необходимо ли, чтобы при изменении значения в какой-либо ключевом кадре менялась вся кривая, либо только ее ограниченная область.

Действия над кривыми. Построение кривой, связанной со значениями параметром в ключевых кадрах, является только первым шагом в анимации. Скорость, с которой происходит движение вдоль кривой, зачастую должна быть под контролем аниматора. Прежде всего, он должен иметь возможность двигаться вдоль кривой значений параметров с постоянным шагом, после чего он может легко ускорить или замедлить движение. Для движения с постоянным шагом требуется установить связь между расстоянием вдоль кривой и значением параметра. Эту связь называют параметризацией длиной дуги пространственной кривой. Для ее определения используют методы численного интегрирования [49]. После параметризации пространственной кривой становится возможным управлять скоростью, с которой происходит движение по кривой. Движение по кривой с постоянной длиной дуги приводит к движению с постоянной скоростью. Возможности ускорения/замедления могут быть получены при помощи функций управления скоростью, которые сопоставляют равноотстоящим значениям параметра (т.е. времени) такие длины дуг, что получается желаемое движение по кривой. Наиболее распространенным примером такого управления скоростью является движение с плавным входом/плавным выходом. При таком способе управления скоростью происходит плавное движение при ускорении объекта из состояния с нулевой скоростью до некоторой, плавное достижение максимальной скорости и плавное торможение. Для этого функцию скорости часто выбирают синусоидой.

Движение вдоль кривой. Различные сложности могут возникнуть при движении (изменении интересующего параметра) по выбранной кривой с определенной скоростью. Если, к примеру, этим параметром является положение трехмерного объекта, а параметрической кривой – траектория его движения, то необходимо принять во внимание также и ориентацию объекта. Если объект или камера движутся вдоль кривой, то их ориентацию можно сделать непосредственно зависимой от кривой. Для этого используют рамку Френе, схема которой изображена на рис. 2. Рамку Френе определяют как движущуюся правостороннюю координатную систему, задаваемую тремя нормализованными векторами T, N, B, где T – вектор, обладающий направлением касательной к кривой, B ортогонален к T и имеет направление второй производной кривой, N является векторным произведением T и B.

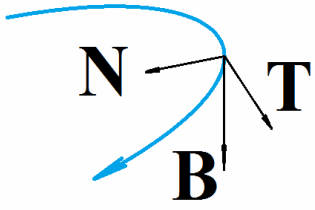


Рис. 2. Рамка Френе

При движении камеры по кривой для определения ее ориентации обычно опираются на задание точки, в которую камера смотрит (центр интереса камеры).

Если один объект движется по поверхности другого объекта, то ориентацию первого можно рассчитывать исходя из нормали к поверхности второго в точке, где находится первый объект.

Преобразование кривой в кривую. Параметрами, заданными в ключевых кадрах, также могут быть кривые. К примеру, в одном ключевом кадре задана окружность, в следующем – граница квадрата. Задача состоит в определении промежуточных кадров (т.е. в определении кривых, составляющих анимацию перехода от окружности к квадрату). В общем случае решение задачи зависит напрямую от способа задания кривых. В простом случае, если известно поточечное соответствие между кривыми в ключевых кадрах, то решение данной задачи сводится к интерполяции между соответствующими точками кривых во времени (рис. 3).

Рис. 3. Преобразование окружности в границу квадрата

В другом случае, если кривые заданы коэффициентами параметрических функций, то промежуточные кривые получают посредством интерполяции параметров этих функций.

Интерполяция между трехмерными объектами. Общего решения пока не существует. Однако для частных случаев есть решения. Методы этих решений делят на две категории [50]:

1) Методы, основанные на работе с поверхностями (*surface based*). Используют граничное представление объектов и изменяют один из них или оба, чтобы их реберно-вершинные топологии совпадали. После этого вершины объектов интерполируют между собой. Имеются ограничения на типы объектов, с которыми они могут работать, особенно на объекты со сквозными отверстиями через них.

2) Методы, основанные на работе с объемами (*volume based*). Рассматривают объемы, заключенные внутри объектов, и приводят один объем к другому. Эти методы имеют преимущество в том, что они менее чувствительны к различным топологиям объектов. Вычислительно более затратные, чем методы, основанные на работе с поверхностями.

Деформация 2D и 3D объектов. Объекты с одинаковой структурой ребер могут быть интерполированы между ключевыми кадрами по вершинам этих ребер для плавного перехода от одной формы объекта к другой. Существуют также возможности и методы, которые предоставляют средства анимации для деформации двумерных и трехмерных объектов, чтобы задавать их в ключевых кадрах.

Искажение объекта. Аниматор может двигать за какие-то вершины на объекте (рис. 4), при этом изменяются либо только смежные с этой вершиной точки, либо более широкая область.

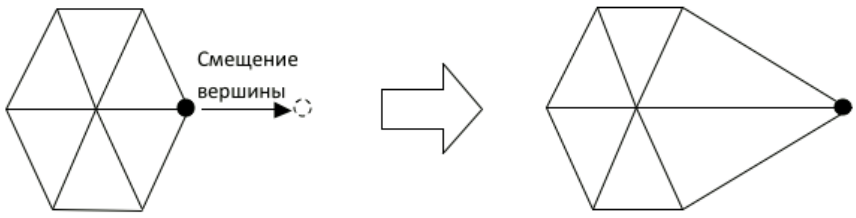


Рис. 4. Смещение вершины

Деформация координатной сетки

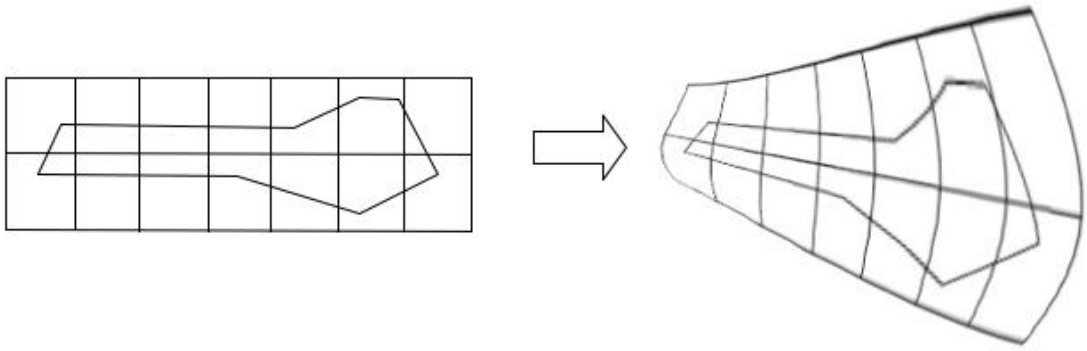


Рис. 5. Деформация по координатной сетке

Метод приписывается Сэдербергу [47]. Выбирается локальная система координат, связанная с объектом. Эта локальная координатная система каким-либо образом искажается аниматором, и локальные координаты вершин отображаются в глобальной системе координат.

Литература:

1. Бондин А.В., Хлыстов А.Н. Молекулярно-динамическое моделирование в машиностроении // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 248–251.

2. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 137–149.

3. Хлыстов А.Н. Автоматизация молекулярно-динамического моделирования // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 255–259.

4. Хлыстов А.Н. Сложность МД-моделирования физических процессов // В сборнике: Молодая мысль: наука, технологии, инновации материалы VIII (XIV) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 284–288.

5. Khlystov A.N., Kirichenko O.P. Negative aspects of molecular dynamic simulation or atomic non-quantum physics // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 205–208.

6. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187–191.

7. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 103–107.

8. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201–207.

9. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. Методика компьютерного моделирования процессов комбинированной электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2014. № 13. С. 91–96.

10. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.

11. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

12. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Кузнецов А.М. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 153–157.

13. Кузнецов А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твёрдосплавным инструментом: дисс. канд. техн. наук 05.03.01 / Иркутский государственный технический университет. Иркутск, 2009. – 186 с.

14. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М., Мажитов С.Х. Определение рациональных режимов обработки и геометрии инструмента при фрезеровании композиционных материалов // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 203–205.

15. Кузнецов А.М., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Слепенко Е.А., Рычков Д.А. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твёрдосплавным инструментом // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 196–200.

16. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68–75.

17. Янюшкин А.С., Кузнецов А.М., Якимов С.А., Петров Н.П. Методика расчета величины разрушения режущей кромки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 8. С. 139–144.

18. Кузнецов А.М., Якимов С.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Расчет напряжений, возникающих при затачивании твёрдосплавного инструмента с малым углом заострения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 22. С. 25–30.

19. Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Износостойкость твердосплавного инструмента при обработке древесностружечных плит // Технология машиностроения. 2008. № 11. С. 29–31.

20. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твердосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2005. Т. 2. С. 153–156.

21. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Недостатки традиционных методов затачивания твердосплавного инструмента и пути их совершенствования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2004. Т. 2. С. 95–98.

22. Попов В.Ю. Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 21–26.

23. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306–308.

24. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206–212.

25. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114–120.

26. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механики XXI веку. 2010. № 9. С. 101–104.

27. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132–138.

28. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799–800. С. 291–298.

29. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 129–135.

30. Янюшкин А.С., Лосев А.Б., Якимов С.А., Попов В.Ю. Роль температуры при затачивании инструментов алмазными кругами на металлической связке // Металлургия и машиностроение: ежеквартальный специализированный информационный бюллетень. 2006. № 1. С. 49–53.

31. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22–29.

32. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68–74.

33. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14–19.

34. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183–190.

35. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. "Ключевая" популярность электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 50–57.

36. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91–102.

37. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189–190.

38. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Сурьев А.А., Ереско В.С., Кузнецов А.М. Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом с его одновременной правкой: пат. 2268118. Рос. Федерация; заявл. 15.06.2004; № заявки 2004118239/02, опубл. 20.01.2006.

39. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Сурьев А.А., Ереско В.С., Кузнецов А.М. Устройство для электроабразивной обработки с одновременной правкой круга: пат. 42193. Рос. Федерация; заявл. 21.07.2004; № заявки 2004122212/22, опубл. 27.11.2004.

40. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.

41. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116428, опубл. 10.11.2003.

42. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Сборная фреза для деревообработки: пат. 2257289. Рос. Федерация; заявл. 30.03.2004; № заявки 2004109804/02, опубл. 27.07.2005.

43. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Сурьев А.А., Кузнецов А.М., Сталидзан М.В. Сборная фреза для деревообработки: пат. 2325272. Рос. Федерация; заявл. 04.07.2006; № заявки 2006124008/03, опубл. 27.05.2008.

44. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с перпендикулярным расположением токопроводящих вставок: пат. 144707 Рос. Федерация. № 2014105640/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. № 24.

45. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок: пат. 144708. Рос. Федерация. № 2014105641/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. 24.

46. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок: пат. 145108 Рос. Федерация. № 2014105639/02; заявл. 14.02.14; опубл. 10.09.14, Бюл. 25.

47. Thalmann M.N., Thalmann D. Computer Animation in Future Technologies // Switzerlang. Miralab. 1998. С. 1–8.

48. May S.F. Encapsulated Models: Procedural Representations for Computer Animation / Ph. D. dissertation, Ohio State University. 1998. 196 p.

49. Пэрент Р. Компьютерная анимация / Пер. с англ. М.: КУДИЦ-Образ, 2004. 560 с.

50. Kent J., Carlson W., Parent R. Shape Transformation for Polyhedral Objects // Proceedings of SIGGRAPH, 92. Computer Graphics. 1992. Т. 26. № 2. С. 47–54.

Basic methods of computer animation in engineering

Bondin A.V.

Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia.
darktony94@gmail.com

Keywords: molecular dynamics simulation, crystal lattice, particles, atomic radius, Blender, program code, adaptability

The uniqueness of computer animation based on methods of molecular dynamics lies in the possibility of its application for modeling both static and dynamic, transient events, in which processes that are impossible to observe by any other tools predominate. These methods are used in describing diffusion processes in impurities and alloys, describing all possible defects in the crystal structure of materials, as well as phase transformations in a solid under the influence of high temperature and pressure factors. Analysis of the data obtained with MD-modeling provides a clear picture of the mechanisms of changes in the composition and structure of materials at the atomistic level, provides the ability to provide information about the dynamics of the system under study or events that occur for several picoseconds, for example, in atomic collisions "cluster-surface" or the growth of protective films.

УДК 621.9.02.

Анализ конструкции сборного сверла со сменными многогранными пластинами

Петрушин С.И.[1a], Губайдулина Р.Х.[1b], Нозирзода Ш.С.[1c]

[1]Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета
[a]psi@tpu.ru, [b]victory_28@mail.ru, [c]shoni_1976@mail.ru

Ключевые слова: сверление, сила сверления, сверла с многогранными пластинами, геометрические параметры режущей части

В статье приведена методика расчета геометрических параметров и силы резания при сверлении сверлами с механическим креплением сменных многогранных твердосплавных пластин. Использован математический аппарат векторной алгебры. Данная методика учитывает все многообразие многогранных пластин: пластины с задними углами и без них, пластины со стружечными канавками и без них. Проведен анализ геометрии сверла конструкции Томского инструментального завода, на основе которого установлены неблагоприятные геометрические параметры центральной пластины сверла. На основе расчетов установлено, что область отрицательных значений главного заднего угла сверла находится около оси сверла, где происходит выкрошивание сменной многогранной пластины и сверло преждевременно теряет свои режущие свойства. Силовой анализ показал, что при работе этими сверлами возникает неуравновешенная радиальная составляющая силы резания. Сделан вывод о необходимости улучшения конструкций сверл со сменными многогранными пластинами путем варьирования конструктивными параметрами.

Введение. Сверла, оснащенные сменными многогранными пластинами (СМП) из твердого сплава, находят все большее применение при обработке материалов с повышенной твердостью[1]. Они, например, применяются для сверления отверстий диаметром 22мм в закаленных железнодорожных рельсах в полевых условиях. При этом наблюдаются выкрошивания и сколы СМП в связи с неблагоприятными условиями работы. Одна из причин этих явлений связана с отсутствием анализа геометрических параметров режущей части сверл с СМП, который значительно отличается от спиральных сверл. Вторая причина кроется в неравномерной силовом нагружении режущих лезвий сверла. В данной работе ставилась задача разработки методика расчета геометрических параметров и силы резания при сверлении сверлами с механическим креплением сменных многогранных твердосплавных пластин и на этой основе проведение анализа существующих конструкций.

Методика исследований. Рассмотрим вначале задачу определения статических геометрических параметров (φ, λ, α, γ) в произвольной точке лезвия сборного сверла по известной форме СМП с учетом ее ориентации в корпусе. За начало отсчета возьмем вершину 0 (рис.1), в которой имеем максимальную скорость резания. Станочные оси координат XYZ имеют следующие направления относительно инструмента [2.3]: Ox – вдоль оси сверла; Oy – по радиусу; Oz – касательно к диаметру. Ориентация СМП к корпусе задана двумя углами: фронтальным γ_x и профильным γ_y, положительные значения которых показаны на рис.2. В отличие от γ_x, имеющего одно и то же значение для всех точек главной режущей кромки, величина γ_y зависит от радиуса текущей точки А.

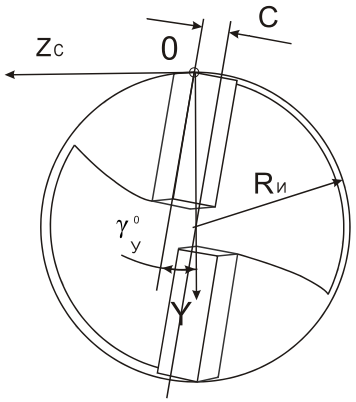
Инструментальная система координат $X_иY_иZ_и$ с центром в т. О жестко связана с СМП, причем ее плоскость $X_иOY_и$ всегда параллельна опорной поверхности гнезда корпуса под режущую пластину [1]. На рабочих чертежах концевых инструментов часто угол γ_y задается расстоянием *c* от вершины СМП до диаметральной плоскости, параллельной обеим пластинам (см.рис.1). Возьмем на рабочем участке режущей кромки СМП произвольную точку A (рис.2). Параллельный перенос станочной системы координат из т. О в т. A дает статическую систему координат [4]. Положение статической основной плоскости в этой точке P^A_{vc}

изменится по сравнению с точкой О и профильный угол ориентации СМП для нее определится из соотношения:

$$\sin\gamma_y^A = \frac{R_u}{R_A}\cdot\sin\gamma_y^O, \qquad (1)$$

где R_A – величина радиуса точки A (см. рис.2);

R_u – радиус инструмента.



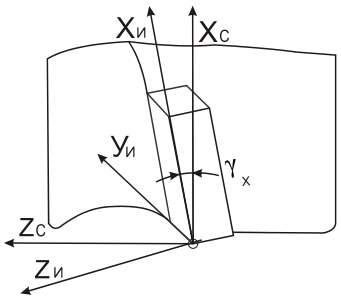


Рис. 1. Углы γ_y и γ_x ориентации СМП в корпусе сверла

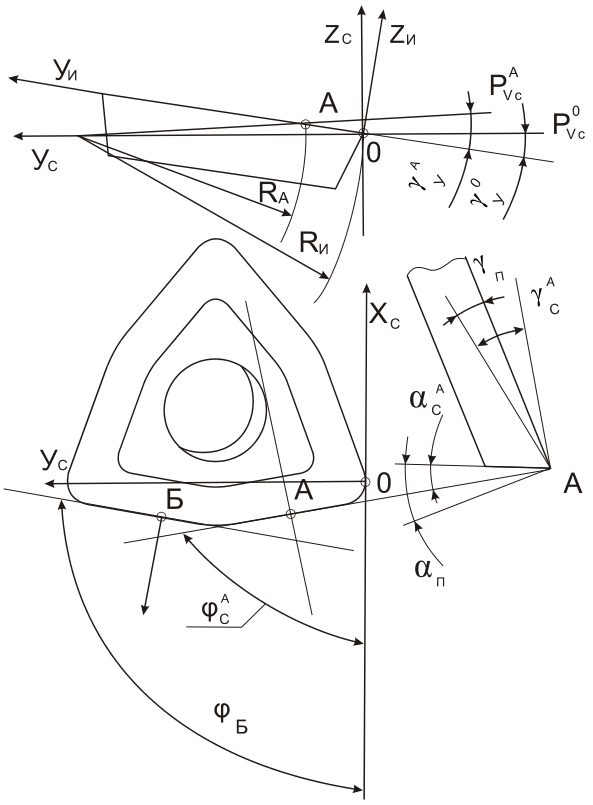


Рис.2. Геометрические параметры в точке A

В результате применения векторной алгебры получены следующие выражения для расчета в точке A [2,4]:

- статического угла в плане

$$tg\varphi_c^A = -\frac{\sin\gamma_x\cdot\sin\gamma_y^A + tg\varphi_u^A\cdot\cos\gamma_y^A}{\cos\gamma_x}, \qquad (2)$$

где φ_u^A - инструментальный угол в плане в точке A;

-статического угла наклона режущей кромки

$$\sin\lambda_c^A = \sin\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_y^A - \cos\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_x\cdot\cos\gamma_y^A, \qquad (3)$$

- статического главного переднего угла

$$\begin{aligned}\sin\gamma_c^A = &-\cos\gamma_{\Pi}^A(\cos\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_y^A + \sin\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_x\cdot\cos\gamma_y^A) + \\ &+\sin\gamma_{\Pi}^A\cdot[\sin\gamma_x\cdot\cos\gamma_x\cdot\sin\gamma_y^A\cdot(\sin\varphi_u^A\cdot\cos\varphi_u^A - \cos^2\varphi_u^A) - \\ &-\cos\gamma_x\cdot\cos\gamma_y^A\cdot(\sin\varphi_u^A\cdot\cos\varphi_u^A + \cos^2\varphi_u^A)]\end{aligned}, \qquad (4)$$

где $\gamma_п^A$ – передний угол на многогранной пластине (см. рис. 2)

- статического главного заднего угла

$$\sin\alpha_c^A = \cos\alpha_{\Pi}^A\cdot(\sin\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_x\cdot\cos\gamma_y^A + \cos\varphi_u^A\cdot\sin\gamma_y^A) + \sin\alpha_{\Pi}^A\cdot\cos\gamma_x\cdot\cos\gamma_y^A, \qquad (5)$$

где $\alpha_п^A$ – задний угол на пластине (см. рис.2).

При $\gamma_п=0$ и $\alpha_п^A=0$ (пластина без стружечных канавок и без заднего угла) формулы (4) и (5) примут вид

$$\sin\gamma_c^A = -\cos\varphi_u^A \cdot \sin\gamma_y^A - \sin\varphi_u^A \cdot \sin\gamma_x \cdot \cos\gamma_y^A \ ;$$

$$\sin\alpha_c^A = \sin\varphi_u^A \cdot \sin\gamma_x \cdot \cos\gamma_y^A + \cos\varphi_u^A \cdot \sin\gamma_y^A \ .$$

Таким образом, задаваясь геометрией СМП и углами ее ориентации в корпусе сборного сверла по формулам (2) - (5), рассчитываются все геометрические параметры лезвия в произвольной точке его режущей кромки.

Силовой анализ радиальной составляющей силы резания и крутящего момента при сверлении основан на суммировании удельных сил, действующих на единицу длины режущей кромки СМП сверла [5].

Примем, что независимо от геометрии элементарного участка режущей кромки СМП в окрестности произвольной точки A (рис.3) для него справедлива схема свободного ортогонального резания [6,7]. Тогда этот участок будет нагружен исходными элементарными составляющими силы резания P_{zi} и, P_{yi} направление которых в инструментальной системе координат определяются следующим образом (см. рис.3):

- P_{zi} перпендикулярен к режущей кромке и лежит в плоскости резания, которая в свою очередь по определению перпендикулярна к основной инструментальной плоскости и проходит через т. A;
- P_{yi} также перпендикулярен к режущей кромке в т. A, всегда направлен внутрь СМП параллельно основной плоскости и лежит в главной секущей плоскости.

В качестве исходных данных для силового анализа принято, что при свободном резании на единицу длины режущей кромки действует P_{zi} и P_{yi}.

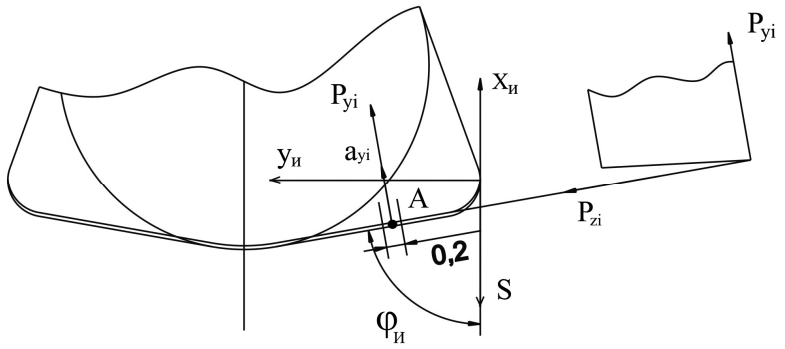


Рис.3. Схема разбиения режущей кромки пластины
для определения элементарных составляющих силы резания

Спроектировав их на направления y_c и z_c, получено:

$$P_z = \sum_{i=1}^{n} (P_{yi} \cdot \cos\varphi_{ui} \cdot \sin\gamma_{yi} - P_{zi} \cdot \cos\gamma_{yi}) \ ; \text{Н} \qquad (6)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{n} (P_{yi} \cdot \cos\varphi_{ui} \cdot \cos\gamma_{yi} + P_{zi} \cdot \sin\gamma_{yi}) \ ; \text{Н} \qquad (7)$$

Если предположить, что P_{zi} и P_{yi} = const, и зная, что $P_{yi}/P_{zi} = k<1$, то расчетные формулы принимают вид:

$$P_z = \Delta P_z \cdot \sum_{i=1}^{n} (k \cdot \cos\varphi_{ui} \cdot \sin\gamma_{yi} - \cos\gamma_{yi}) \ ; \qquad (8)$$

$$P_y = \Delta P_z \sum_{i=1}^{n} (k \cdot \cos\varphi_{ui} \cdot \cos\gamma_{yi} + \sin\gamma_{yi}) \ , \qquad (9)$$

где n – число участков разбиения режущей кромки.

ΔP_z – удельная касательная сила резания, приходящаяся на 1 мм режущей кромки[8,9]. Абсолютная величина её определялась по экспериментальным данным [5].

Результаты и обсуждение. Используя вышеприведенную методику расчета геометрии, была проанализирована конструкция сборного сверла, оснащенного сменными многогранными пластинами производства Томского инструментального завода. Общий вид и схема крепления пластин этого сверла представлены на рис.4. и рис.5. Сверло характеризуется наличием двух сменных многогранных твердосплавных пластин.

Рис.4. Общий вид сверла с СМП

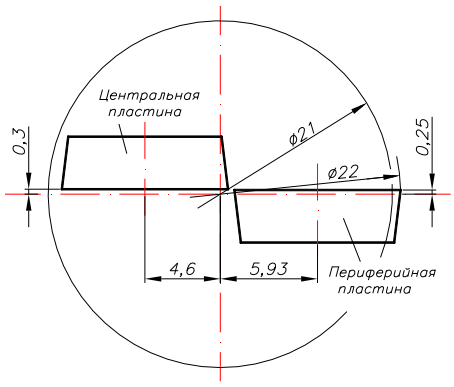


Рис.5. Схема крепления СМП на сверле

Для расчета статических геометрических параметров разобьем режущую кромку каждой пластины на участки равной длины и определим для каждого участка по формулам (2) - (5) статические геометрические параметры. Результаты расчета статических заднего угла α, переднего угла γ и угла наклона главной режущей кромки λ сверла для центральной пластины представлены на рис.6. Из него следует, что на участке режущей кромки, прилегающему к центру сверла, на длине около одного миллиметра главный задний угол принимает отрицательные значения. Это приводит к затиранию здесь задней поверхности центральной СМП.

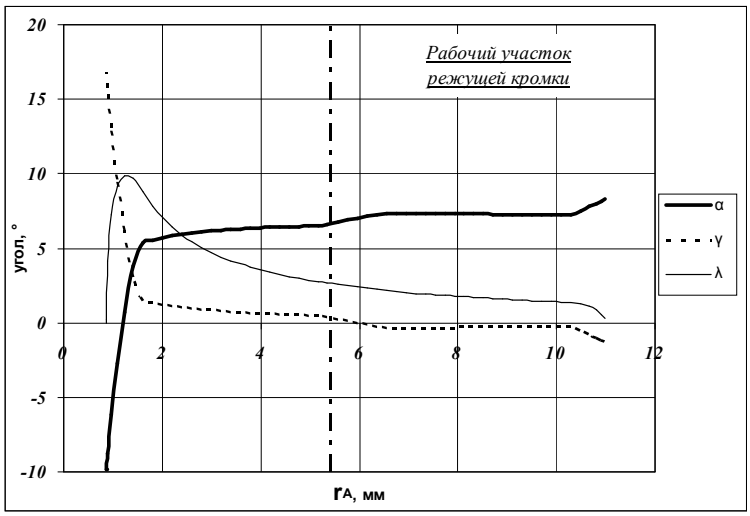


Рис.6. Изменение статических геометрических параметров по длине режущей кромки для центральной пластины

Аналогичные расчеты значений геометрических параметров, проведенные для периферийной пластины, показывают, что периферийная пластина работает в более благоприятных условиях по сравнению с центральной, так как во всех точках режущего лезвия задний угол имеет положительные значения.

По методике, изложенной выше, рассчитаны сила резания и крутящий момент на сборном сверле с СМП. В качестве исходных данных для силового анализа принята удельная касательная сила резания, приходящаяся на 1 мм режущей кромки ΔP_z=364 Н/мм, k=0,4 [5]. Режущая кромка каждой пластины разбивалась на участки равной длины по 0,2 мм и на каж-

дом участке определялись составляющие силы резания. Эпюры распределения составляющих силы резания P_y и P_z представлены на рис. 7 и рис.8.

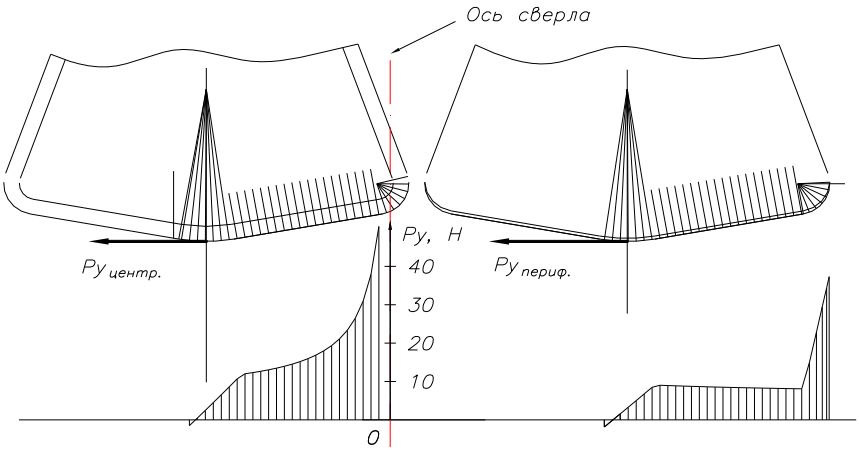


Рис.7. Эпюры распределения составляющей силы резания P_y по длине рабочих участков режущих кромок пластин

После суммирования были получены результирующие значения составляющих силы резания:

для центральной пластины – P_z=1979,8 Н, P_y=315,1 Н, М=5005 Н·мм;

для периферийной пластины – P_z=2249 Н, P_y=323,4 Н, М=18670 Н·мм.

Как следует из рис.7, составляющие силы резания P_y от каждой пластины складываются, а не взаимно компенсируются, что приводит к возникновению неуравновешенной суммарной радиальной составляющей.

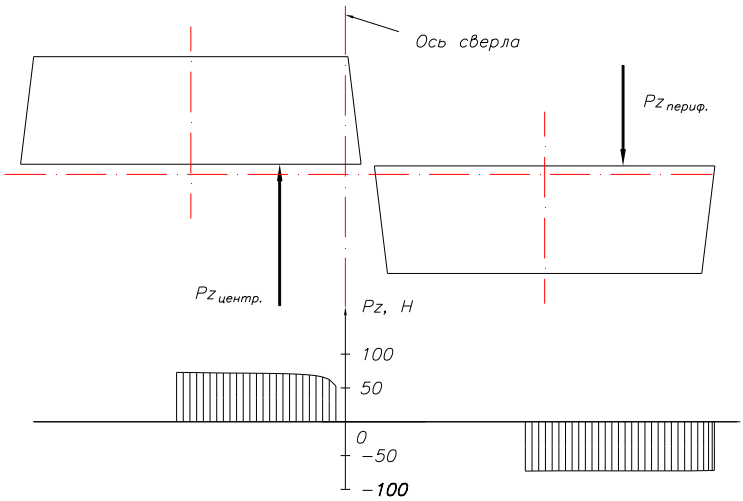


Рис.8. Эпюры распределения составляющей силы резания P_z по длине рабочих участков режущих кромок пластин

Несимметричное распределение тангенциальной составляющей сил резания (см.рис.8) приводит к возникновению эксцентриситета точки приложения суммарного крутящего момента относительно оси сверла.

Было рассчитано расстояние a от оси сверла до точки приложения результирующей составляющей силы резания P_z согласно теореме Вариньона по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{zi} \cdot r_i}{\sum_{i=1}^{n} P_{zi}}, \qquad (10)$$

где r_i – расстояние от оси сверла до i-го участка режущей кромки.

Для центральной пластины – a=2,581·мм;

для периферийной пластины – a=8,302·мм.

В табл.1 приведены результаты расчета составляющих силы резания для различных вариантов геометрии пластин в зависимости от с и γ_x. Выделен наиболее благоприятный вариант расположения пластин, при котором достигается минимальное значение составляющей силы резания P_y.

Таблица 1

Пластина	γ_x, °	с, мм	a, мм	Pz, Н	М, Н мм	Py, Н
периферийная	**-5**	**0**	**8,306**	**-2258,4**	**-18759**	**243,8**
	-5	0,1	8,305	-2255,7	-18733	272,3
	-5	0,25	8,303	-2250,8	-18689	314,9
	-5	0,3	8,302	-2249,1	-18673	329,1
	0	0	8,305	-2256,8	-18742,2	252,3
	0	0,1	8,303	-2254,0	-18715,5	280,8
	0	0,25	8,301	-2249,0	-18670,2	323,4
	0	0,3	8,301	-2247,2	-18653,7	337,6
	+5	0	8,303	-2255,2	-18725	260,8
	+5	0,1	8,302	-2252,3	-18698	289,3
	+5	0,25	8,300	-2247,2	-18651	331,9
	+5	0,3	8,299	-2245,3	-18634	346,1
центральная	-5	0	2,698	-1926,5	-5199	231,4
	-5	-0,1	2,787	-1855,7	-5171	291,1
	-5	-0,2	2,857	-1795,9	-5132	409,3
	-5	-0,3	2,929	-1735,6	-5084	434,0
	0	0	2,649	-1965,6	-5206,7	129,7
	0	-0,1	2,765	-1874,0	-5182,3	240,3
	0	-0,2	2,808	-1834,2	-5151,0	360,3
	0	-0,3	2,905	-1755,7	-5101,0	399,2
	+5	**0**	**2,668**	**-1951,9**	**-5208**	**20,2**
	+5	-0,1	2,667	-1948,0	-5196	228,2
	+5	-0,2	2,779	-1858,4	-5165	310,0
	+5	-0,3	2,838	-1805,9	-5125	428,9

Также было проанализировано изменение силовых параметров сборного сверла при взаимном выдвижении пластин по оси X. Положительное направление взаимного выдвижения пластин Δx вдоль оси X представлено на рис.9. Результаты этого анализа представлены на рис.10.

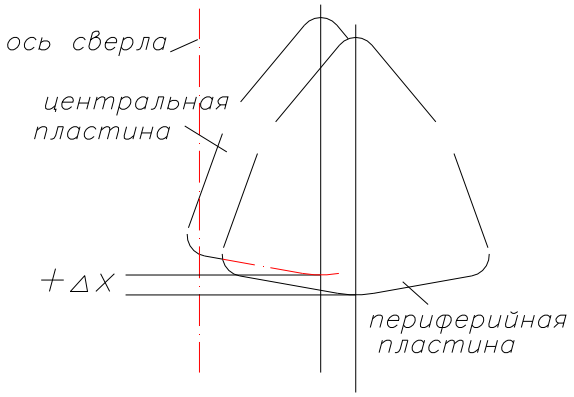


Рис.9. Взаимное выдвижение пластин вдоль оси X

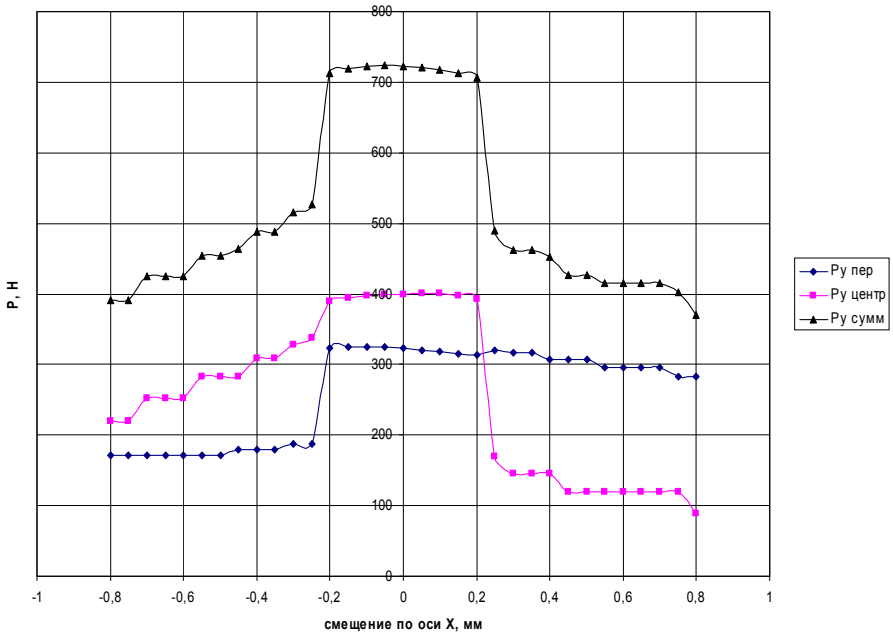


Рис.10. Изменение радиальной составляющей сборного сверла
в зависимости от взаимного выдвижения пластин вдоль оси X

Из анализа этого графика следует, что существует значение взаимного выдвижения пластин Δx, при котором достигается минимальное значение составляющих силы резания и, как следствие, минимальный дисбаланс сил, возникающих в процессе сверления.

Выводы:

1. Одной из причин низкой работоспособности сверл со сменными многогранными пластинами является неблагоприятная геометрия на центральной пластине.

2. Вторая причина связана с возникновением неуравновешенной радиальной составляющей силы резания, что в условиях нежесткой технологической системы может привести к преждевременному выходу сверла из строя.

3. Усовершенствование конструкции сверла с СМП проводится путем варьирования такими конструктивными параметрами, как с, γ_X и ΔX.

Литература:

1. Tonshoff, H.K., Arendt, C., Ben Amor, R. Cutting of hardened steel // CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2009.Vol. 49 (2). P. 547-566.

2. Петрушин С.И., Баканов А.А., Махов А.В. Геометрический анализ конструкций сборных режущих инструментов со сменными многогранными пластинами. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 101 с.

3. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 204 с.

4. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Методика определения геометрических параметров сборных режущих инструментов. // Успехи современного естествознания. 2007, № 8. С. 90 – 91.

5. Баканов А.А. Повышение работоспособности сверл со сменными многогранными пластинами при сверлении железнодорожных рельсов. Канд. дисс. Томск, 2007. 171 с.

6. Li, B.,Wang, X., Hu, Y., Li, C. Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 54 (5-8), P. 431-443.

7. Tsekhanov, J., Storchak, M. Development of analytical model for orthogonal cutting // Production Engineering. 2015. Vol.9 (2). P. 247-255.

8. Molinari, A., Cheriguene, R., Miguelez, H. Numerical and analytical modeling of orthogonal cutting: The link between local variables and global contact characteristics // International Journal of Mechanical Sciences. 2011. Vol.53 (3), P. 183-206.

9. Heisel, U., Kushner, V., Storchak, M. Effect of machining conditions on specific tangential forces // Production Engineering. 2012. Vol. 6 (6), P. 621-629.

10. Rott, O., Hömberg, D., Mense, C. A comparison of analytical cutting force models // 2006.WIAS, Berlin: Preprint No. 1151. P. 23.

Analysis of a ready made drill design with changeable multifaceted inserts

Petrushin S.I.[1a], Gubaidulina R.H.[1b], Nosirsoda Sh.C.[1c]

[1]Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic Universit
26 Leningradskaya st., Kemerovo Region, Yurga, 652000, Russian Federation
[a]psi@tpu.ru, [b]victory_28@mail.ru, [c]shoni_1976@mail.ru

Keywords: drilling, drilling force, drills with polyhedral plates, geometrical parameters of the cutting part

The paper reports the procedure of calculating geometrical parameters and cutting force when drilling with changeable inserted multifaceted carbide tools. A body of mathematics of vector algebra is used. This procedure takes into account all possible configurations of multifaceted inserts: inserts with (without) end clearance angles, inserts with (without) chip grooves. The geometry of a drill tool manufactured by Tomsk instrumental plant is analyzed; it helped to find out insufficient geometrical parameters of the central drill insert. Using the calculations it was revealed that the zone of negative values in the main rear angle of the drill is near the drill axis, where chipping of a changeable multifaceted insert is registered and cutting qualities of a drill get worse untimely. Having analyzed the forces it was found out that misbalanced radial component of the cutting force arises between theses drills when operated. A conclusion is made that it is necessary to improve the design of drills with changeable multifaceted inserts via varying their constructive parameters.

УДК 621.914

Повышение эффективности фрезерования геометрически сложных деталей путем коррекции положения инструмента

Кузнецов С.Ф.

Липецкий государственный технический университет, ул. Московская, 30, Липецк, Россия
sergey_kuzn@mail.ru

Ключевые слова: фрезерование, режимы резания, управляющая программа, коррекция

В работе рассматривается технология фрезерования геометрически сложных деталей концевыми сферическими фрезами, и предлагается способ управления процессом, основанный на делении траектории движения инструмента на участки и коррекции положения инструмента на каждом из них исходя из анализа его упругих перемещений (вибрации), а так как при данном процессе резания происходят резкие изменения сил резания, то основной задачей становится выравнивание нагрузки на инструмент для повышения его стойкости. Предлагаемый способ фрезерования позволяет вести высокопроизводительную обработку сложных вогнутых поверхностей за счет повышения стойкости режущего инструмента, которое обеспечивается минимизацией упругих перемещений (виброперемещений) инструмента на каждом участке траектории за счёт коррекции подачи с постоянным перемещением вершины режущей кромки относительно поверхности резания.

Введение. В настоящее время одним из самых сложных процессов механической обработки металлов является фрезерование поверхностей геометрически сложных деталей, например, штампов и пресс-форм, точность размеров которых соответствует 5-6-му квалитету ISO [1]. Возможности современных многоцелевых станков с ЧПУ позволяют обеспечить качество изготовления таких поверхностей, но лишь при использовании нетривиальных техно-

логических решений и приемов [2, 3]. Наличие необработанных, после черновой обработки, зон приводит к резкому увеличению сил резания, что вызывает возрастание упругих деформации инструмента (виброперемещений), снижая его стойкость и не позволяя достичь необходимой производительности или точности процесса.

Обеспечить заданную точность изготовления деталей на станках с ЧПУ можно за счет коррекции (предыскажения) траектории относительного перемещения инструмента и обрабатываемой заготовки на основании предварительных расчетов или измерений [4–6].

Актуальной является задача определения составляющих силы резания при обработке фрезами со сферической рабочей частью. Данный инструмент нашел широкое применение при изготовлении сложных поверхностей в условиях, когда применение другого инструмента исключено по причине невозможности обработки (наличие поднутрений, скосов, криволинейных поверхностей различных радиусов и т.п.). Знание составляющих силы резания в данном случае необходимо для прогнозирования качества обработанной поверхности, а также для расчетов на прочность самого инструмента.

Анализ публикаций по данной теме [7] показывает, что целостный подход к решению данной задачи отсутствует.

Теория. Управление процессом резания осуществляется с помощью специально разработанной программы. Для современных станков с ЧПУ управляющая программа разрабатывается в CAM-системе по 3D-модели детали, построенной по номинальным размерам. По заданной в программе номинальной поверхности формируется траектория инструмента, но возникающие при резании силы стремятся сместить режущую кромку инструмента от обрабатываемой поверхности (виброперемещение инструмента). Таким образом, формируется фактическая поверхность, отличная от номинальной, которая, тем не менее, должна находиться в пределах допуска [8].

Для повышения стойкости инструмента и обеспечения точности обработки предлагается использовать управляющую программу, которая осуществляет коррекцию положения инструмента относительно номинальной поверхности. Коррекция заключается в изменении значения подачи на зуб инструмента, в зависимости от участка обработки - для уменьшения величины упругих перемещений инструмента. Расчёт производится из условия приближения инструмента к номинальной поверхности на величину глубины резания, при которой происходит уменьшение упругих перемещений инструмента на заданном участке траектории.

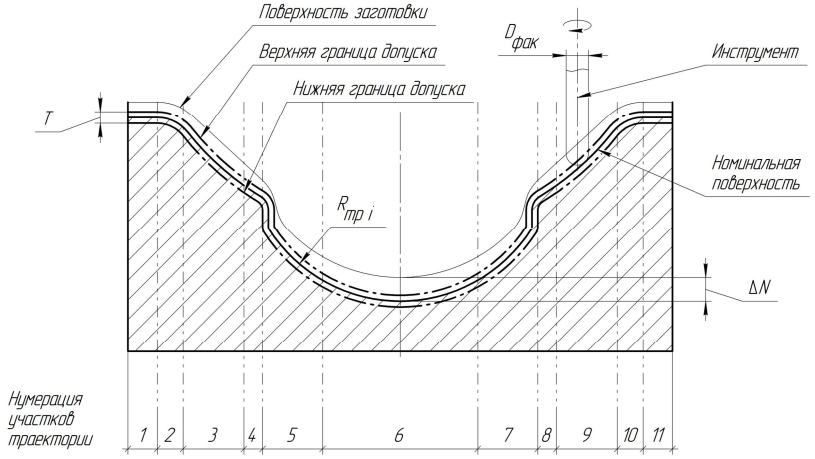


Рис. 1. Схема формирования поверхности

Управляющая программа состоит из набора точек, по которым формируется траектория инструмента; две ближайшие точки формируют угол перемещения инструмента относительно его оси. Фактическая образуемая поверхность находится на расстоянии отклонения формы от номинальной поверхности (рис. 1), следовательно, расчет программируемого диаметра инструмента производится по выражению:

$$D_{фак.} = D_{тех.} + 2 \times N + \frac{\Delta T}{2} \Rightarrow D_{тех.} = D_{фак.} - 2 \times \Delta N - \frac{\Delta T}{2},$$

где $D_{фак.}$ – фактически используемый диаметр инструмента; $D_{тех.}$ – диаметр инструмента используемый при проектировании программы в CAM системе; ΔT – допуск; ΔN – упругие перемещения, формируемые изменениями усилий резания [9].

Анализ ряда исследований [10–12] показал, что положение инструмента в каждой точке траектории может корректироваться с автоматическим покадровым управлением режимами резания, прежде всего подачи, с учётом изменения геометрии зоны резания. Для расчёта величины коррекции создаётся управляющая программа, содержащая расчетно-исполнительный блок, позволяющий определять изменение геометрических параметров зоны резания и корректировать параметры подачи.

Для определения величины коррекции инструмента, рассчитывается величина упругих перемещений фрезы на любом участке обрабатываемой поверхности, в зависимости от геометрии зоны резания, и ее значение приводится к постоянной величине (рис.2).

Величина упругих перемещений инструмента формирует погрешность обработки

$$\Delta N = \frac{\Delta X \frac{\partial Z}{\partial X} + \Delta Y \frac{\partial Z}{\partial Y} + \Delta Z}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}, \qquad (1)$$

где ΔX, ΔY, ΔZ – величины упругих перемещений по соответствующим осям; $\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции Z=f(X, Y) по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности).

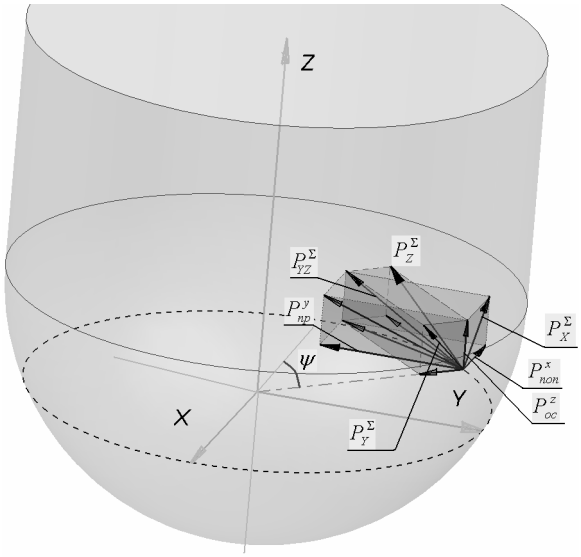


Рис. 2. Разложение сил, действующих на зуб сферической фрезы

Величины упругих перемещений определяются по выражениям:

$$\Delta X = \frac{P_{пол.}^{X}}{J_X};\ \Delta Y = \frac{P_{пр.}^{Y}}{J_Y};\ \Delta Z = \frac{P_{oc}^{Z}}{J_Z},$$

где $P_{пол}^{x}$, $P_{пр}^{y}$, P_{oc}^{z} – проекции результирующей силы резания на координатные оси станка [13].

Для определения изменения сил резания при фрезеровании сферическим инструментом вогнутых поверхностей сложной формы в управляющей программе используются выражения:

$$dP_x^{\Sigma} = 0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\cos\varphi_1\left(5{,}24S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}} + I_з\,\mathrm{tg}\left(80 + \lambda - 2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right)$$

$$dP_z^{\Sigma} = 0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\left(15{,}87S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}} + I_з\,\mathrm{tg}\left(80 + \lambda - 2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right),$$

$$dP_y^{\Sigma} = 0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\sin\varphi_1\left(5{,}24S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}} + I_з\mathrm{tg}\left(80+\lambda-2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right),$$

где σi – интенсивность напряжений при резании, Па, $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; $I_з$ – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; T – предварительный припуск, мм; λ – угол резания, град.; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки, $S_{зуб}$ – подача на зуб, мм/об; φ – угол профиля фрезы, град. [14].

Угол контакта при обработке “стенки” (рис.3)

$$\Delta\varphi = \arcsin\frac{(R_{тр.}+R_{фр.}-T)\times\sin\left(\arccos\left(\dfrac{R_{тр.}{}^2+(R_{тр.}+R_{фр.}-T)^2-R_{фр.}{}^2}{2R_{тр.}(R_{тр.}+R_{фр.}-T)}\right)\right)}{R_{фр.}};$$

при обработке “дна”

$$\Delta\varphi = \arcsin\frac{\sqrt{(H_{ок}-(R_{тр}-R_{тр}\cos\alpha))(2R_{фр.}-H_{оп}-(R_{тр}-R_{тр}\cos\alpha))}}{R_{фр}},$$

где $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы, мм; T – предварительный припуск, мм; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; $R_{тр.}$ – радиус траектории движения инструмента, мм; α – угол врезания, град.

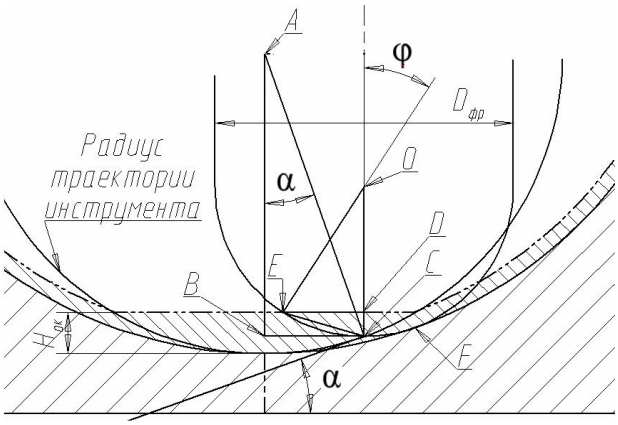


Рис. 3. Схема определения угла контакта

Таким образом, из выражения (1) получим формулу погрешности механической обработки при фрезеровании вогнутых поверхностей сложной формы на произвольном участке

$$\begin{aligned}\Delta N_{Ci} = ((&0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\left(15{,}87S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}}+I_з\mathrm{tg}\left(80+\lambda-2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right)\sin\psi - \\ &-0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\left(5{,}24S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}}+I_з\mathrm{tg}\left(80+\lambda-2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right)\cos\psi)\frac{\partial Z}{\partial X}+ \\ &+(0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\left(15{,}87S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}}+I_з\mathrm{tg}\left(80+\lambda-2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right)\cos\psi + \\ &+0{,}252\sigma_i R_{фр.}\Delta\varphi\left(5{,}24S_{зуб.}\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}}+I_з\mathrm{tg}\left(80+\lambda-2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right)\sin\psi)\frac{\partial Z}{\partial Y})\times \\ &\times\frac{l^3}{2{,}4ER_{фр.}^4}\frac{1}{\sqrt{\left(\dfrac{\partial Z}{\partial X}\right)^2+\left(\dfrac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2+1}},\end{aligned} \tag{2}$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па, $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; $I_з$ – сте-

пень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; V – скорость резания, мм/мин; λ – угол резания, град.; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки, $S_{зуб}$ – подача на зуб, мм/об; φ – угол профиля фрезы, град; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – величины упругих перемещений по соответствующим осям; $\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ – частные производные функции *Z=f(X, Y)* по аргументам *X* и *Y* (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности) [14].

Выражение (2) позволяет определять формируемую погрешность обработки с учетом кинематических и геометрических изменений зоны резания, а так же с учетом жесткости режущего инструмента.

Далее, из выражения (2) определяется подача на зуб фрезы

$$S_{зуб.} = \frac{\frac{4,76\ ER_{фр.}^{3}\ \Delta N\ \sqrt{2\cos\ \alpha^{2}+1}}{\sigma_i \Delta\varphi\ l^{3}\cos\ \alpha} - I_з \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9\ I_з}{\left(15,87\sqrt{\frac{H}{2R_{фр.}}} + 30\ I_з \sin\left(\frac{V}{2,23}\right)\right)}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па, $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; $I_з$ – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; V – скорость резания, мм/мин; λ – угол резания, град.; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки, ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град.

Угол врезания, при котором инструмент приблизится к ранее необработанной зоне, можно определить по выражению:

$$\alpha_2 = 90 - \alpha \sin\frac{(R_{mp} - H_1)}{R_{mp}},$$

где $R_{фр.}$ – радиус траектории движения инструмента (определяется по трем ближайшим точкам стойкой ЧПУ), мм; H_1 – глубина резания, мм; α – начальный угол врезания, град.

Значение оптимальной глубины резания в ранее необработанной зоне

$$H_{оп} = \frac{R_{фр.} \times \operatorname{tg}\left(\alpha \sin\frac{R_{фр.}}{R_{пов.}}\right)}{2} + T,$$

где $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы, мм; $R_{пов.}$ – радиус поверхности на данном участке траектории, мм; T – предварительный припуск, мм; ΔT – заданная величина отклонения, мм; α – начальный угол врезания, град.

Зависимость (3) позволяет рассчитать значения подачи с учетом геометрических и скоростных изменений стружкообразования на любом участке обрабатываемой поверхности, для фрез диаметром до 20 мм, на скоростях резания до 400 м/мин.

Для коррекции подачи на каждом участке траектории с целью минимизации упругих перемещений фрезы вводится коэффициент коррекции.

$$S_i = S_з K,$$

где S_i – подача на любом участке, мм/об; $S_з$ – заданная подача, мм/об; K – коэффициент коррекции.

Коэффициент коррекции подачи рассчитывается в зависимости от прохода для каждого участка траектории.

$$K_{Ti} = \frac{S_{зуб.i+1}}{S_{зуб.i}},$$

где i – номер соответствующего участка траектории.

Для каждого участка траектории подача на зуб определяется по формуле (3)

$$S_{зуб.\text{i}} = \frac{A - I_з \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9I_з}{\left(15{,}87\sqrt{\frac{T_\text{i}}{2R_{фр.}}} + 30I_з \sin\left(\frac{V_i}{2{,}23}\right)\right)},$$

где V – скорость резания, мм/мин; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; λ – угол резания, град.; T_i – припуск на заданном участке, мм; K – коэффициент усадки стружки, ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град; I – длина траектории, мм; A – величина, введённая для упрощения формулы.

$$A = \frac{4{,}76ER_{фр.}^3 \Delta N\sqrt{2\cos\alpha_i^2 + 1}}{\sigma_i\left(\arcsin\frac{\sqrt{(H_{ок.i} - (R_{mp.i} - R_{mp.i}))(2R_{фр.} - H_{ок.i} - (R_{mp.i} - R_{mp\cdot i}))}}{R_{фр}}\right)l^3},$$

где E – модуль упругости первого рода, Па; σ_i – интенсивность напряжений при резании, Па; $\Delta\varphi$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, град; $I_з$ – степень износа зуба, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; $H_{оп}$ – оптимальная глубина резания, мм; K – коэффициент усадки стружки, ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град; I – длина траектории, мм.

Таким образом, получим выражение для расчёта коэффициента коррекции на первом проходе (ранее необработанной зоны):

$$K_{Ti} \approx (0{,}006S + 4)R_{фр.}^{-1,3} Ln(R_{mp.} + R_{фр.}), \quad (4)$$

где S – линейная подача, мм; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; α – угол врезания, град; $R_{mp.}$ – радиус траектории движения инструмента, мм.

При обработке на втором и последующих проходах подача на зуб определяется из выражения:

$$\text{S}_{\text{зуб.i}} = \frac{\text{A} - I_з \operatorname{tg}(80 + \lambda) + 9I_з}{\left(15{,}87\sqrt{\frac{T}{2R_{фр.}}} + 30I_з \sin\left(\frac{V}{2{,}23}\right)\right)},$$

где V – скорость резания, мм/мин; $R_{фр.}$ – радиус сферы фрезы; λ – угол резания, град.; T_i – припуск на заданном участке, мм; K – коэффициент усадки стружки, ΔN – погрешность обработки, мм; φ – угол профиля фрезы, град; I – длина траектории, мм; A – величина, введённая для упрощения формулы.

$$A = \frac{4{,}76ER_{фр.}^3 \Delta N\sqrt{2\cos\alpha^2 + 1}}{\sigma_i\left(\arcsin\frac{\sqrt{(H_{ок.})(2R_{фр.} - H_{ок.})}}{R_{фр}}\right)}$$

Коэффициент коррекции на втором и последующих проходах

$$K_i \approx \frac{1}{l^{0,5}} \quad (5)$$

где l – длина данного участка траектории, мм.

Результаты и обсуждение. В предлагаемом способе фрезерования инструмент одновременно с перемещением своей опорной точки по криволинейным траекториям совершает еще и вращение вокруг своей оси. Направление движения фрезы по криволинейным траекториям и ее вращение вокруг оси в предпочтительном варианте должны быть взаимно проти-

воположны. При соблюдении этого условия фрезерование происходит по подаче в щадящем для фрезы режиме. На оба указанных выше движения накладывается, кроме того, поступательное движение подачи опорной точки инструмента. При этом управление процессом осуществляется на основе коррекции подачи на зуб инструмента для минимизации его упругих перемещений, с определением оптимальной величины глубины резания, а расчёт корректировки положения инструмента осуществляется относительно виртуальной номинальной поверхности на основе зависимостей (4) и (5).

Вывод. Предлагаемый способ фрезерования позволяет вести высокопроизводительную обработку сложных вогнутых поверхностей за счет повышения стойкости режущего инструмента, которое обеспечивается минимизацией упругих перемещений (виброперемещений) инструмента на каждом участке траектории за счёт коррекции подачи с постоянным перемещением вершины режущей кромки относительно поверхности резания.

Литература:

1. Носов М.В., Кондаков А.И. Коррекция положения инструмента при обеспечении качества изготовления прецизионных поверхностей деталей на многоцелевых станках с ЧПУ. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 9.

2. Sarhan A.A.D., Hassan M.A., Matsubara A., Hamdi M. High-Precision Machining by Measuring and Compensating the Error Motion of Spindle's Axis of Rotation in Radial Direction. Engineering Letters, 19:4, EL_19_4_06.

3. Амбросимов С.К. Новые прогрессивные методы деформирующе-режущего протягивания и инструменты / Вестник Липецкого государственного технического университета. № 1 (27) 2016. С. 54 – 63

4. Аверченков В.И., Филлипова Л.Б., Пугач Л.И. Программный комплекс определения величины коррекции на инструмент для обрабатывающих центров с датчиками активного контроля. Известия ТулГУ. Технические науки, 2013, вып. 7, ч. 1, с. 71–78.

5. Eichner T., Hohmann M., Linder I. Taktil oder berührungslos in-Processmessen. Werkstatt + Betrieb, 2012, no. 12.

6. Hennecke K. BAZ-Tuning für jedermann. Werkstatt + Betrieb, 2012, no. 11.

7. Внуков Ю.Н., Саржинская А.Г. Анализ особенностей различных подходов при аналитическом расчете сил резания // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн.сб. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2008.-Вып.74 – С.31-56.

8. Козлов А.М., Кирющенко Е.В. Управление процессом фрезерования крупногабаритных деталей на основе обратной связи // Справочник. Инженерный журнал. 2013. №1. С. 30 – 34.

9. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение эффективности чистового объемного 3D фрезерования на станках с ЧПУ // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. №6. С. 39-43.

10. Кирющенко Е.В. Моделирование динамики технологической системы при фрезеровании // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10. С. 87 – 93.

11. Козлов А.М., Малютин Г.Е. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. 2014. №12. С. 71-75.

12. Козлов А.М., Кирющенко Е.В. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 3. С. 65 – 73.

13. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Методика оценки колебаний системы при торцовом фрезеровании портативным оборудованием // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. VII Междунар. научно-тех. конференции – Томск: ТПУ, 2013. С. 295 – 299.

14. Малютин Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. №4(306). С. 74-81.

Improving the efficiency of milling geometrically complex parts by correcting the tool position

Kuznetsov S.F.

Lipetsk State Technical University, 30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russia
sergey_kuzn@mail.ru

Keywords: milling, cutting modes, control program, correction

In the paper, the technology of milling geometrically complex parts with end spherical mills is considered, and a method of process control based on dividing the tool path into sections and correcting the position of the tool on each of them is proposed based on the analysis of its elastic displacements (vibration), and since in this cutting process sharp changes in cutting forces occur, then the main task is to equalize the load on the tool to increase its resistance. The proposed method of milling allows for high-performance processing of complex concave surfaces by increasing the durability of the cutting tool, which is ensured by minimizing the elastic movements (vibro-displacements) of the tool in each part of the trajectory due to feed correction with constant displacement of the tip of the cutting edge relative to the cutting surface.

УДК 65.011.56

Применение систем инженерного анализа при проектировании лесопогрузчиков

Колесников П.Г.[1,a], Гордеев М.П.[1,b], Пешков А.А.[1,c]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, г. Красноярск, Россия
[a]mfsibgtu@mail.ru, [b]mp_gordeev@mail.ru, [c]peshkov140@mail.ru

Ключевые слова: CAE-системы, трехмерное моделирование машиностроительных объектов

В статье рассматриваются вопросы проектирования технологического оборудования фронтального лесопогрузчика с использованием CAE-систем. 3D моделирование и инженерный анализ в современном машиностроительном производстве занимает значительный объем общих трудозатрат всех стадий подготовки конструкторской документации. Используемые в конструкторских бюро пакеты трехмерного твердотельного параметрического моделирования разнообразны и многофункциональны и позволяют на стадии проектирования не только получить визуализированное представление конечного продукта в виде трехмерной модели, но и произвести необходимый перечень исследовательских, инженерных, экспериментальных работ с целью минимизации ошибок, снижения времени проектирования, оптимизации параметров конечного объекта, снижение издержек проектирование, получения максимального экономического эффекта от реализации готового изделия. Процесс проектирования технологического оборудования лесопогрузчика, представленный в статье, дает общее необходимое представление о современных подходах к созданию новых изделий машиностроения.

В современном проектировании широко используются различные программные пакеты автоматизированного конструирования (CAE-системы), позволяющие проводить инженерный анализ моделей и сборок, не прибегая к реальным экспериментам.

CAE (Computer-Aided Engineering) - комплекс программных продуктов инженерного анализа, которые позволяют моделировать поведение исследуемого объекта в реальных условиях эксплуатации [1 – 2]. В работе программные продукты используют различные математические методы анализа: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов. Проанализируем применение программного продукта SolidWorks, использующий метод конечных элементов при проектировании лесопогрузчиков.

Первым этапом проектирования является выбор базовой машины и проведение обоснований для построения чертежей общих видов, проектируемого технологического оборудования лесопогрузчика, которые проводятся по известным методикам [3]. Разработка 3D модели осуществляется в любой CAD-системе, выбор которых по функционалу сегодня многообразен. В Сибирском государственном аэрокосмическом университете имени академика М.Ф. Решетнева в образовательном процессе трехмерное моделирование машиностроительных объектов зачастую проводят в таких комплексных программах как Компас, AutoCad, SolidWorks.

Инженерный анализ сборочных единиц в SolidWorks начинается с определения материала каждой детали, входящей в сборку, установки условий и ограничений функционирования системы. Программный комплекс позволяет проводить статический и частотный анализы, испытание на ударную нагрузку, усталость, линейный и нелинейный анализы, проводить оценку воздействия температуры окружающей среды на функционирование системы.

После выбора материала и определения условий функционирования системы проводят, конечно-элементный, анализ, который начинается с построения сетки конечных элементов (рис. 1).

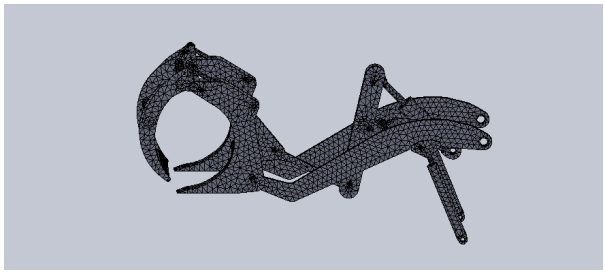


Рис. 1. Сетка конечных элементов при инженерном анализе технологического оборудования фронтального лесопогрузчика

Сформированная сетка конечных элементов на исследуемом объекте позволяет проводить весь спектр необходимых расчетов и исследований. На примере статического анализа системы получаем расчетные значения напряжений в элементах конструкции, перемещений, статической деформации, обоснование запаса прочности конструкции (рис. 2, 3, 4, 5).

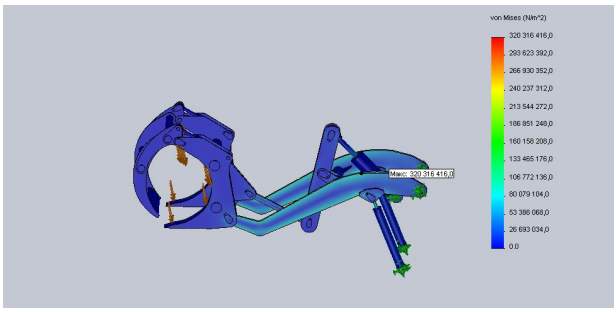


Рис. 2. Эпюра статистических напряжений в элементах конструкции технологического оборудования фронтального лесопогрузчика

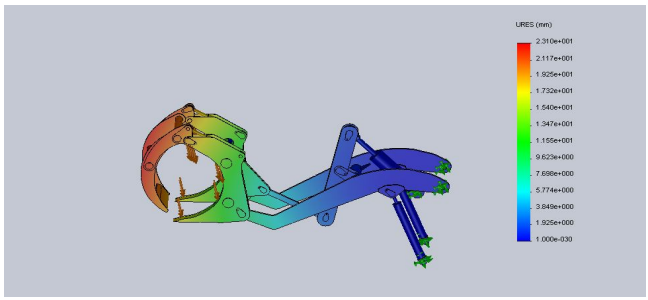


Рис. 3. Эпюра перемещений в элементах конструкции технологического оборудования фронтального лесопогрузчика

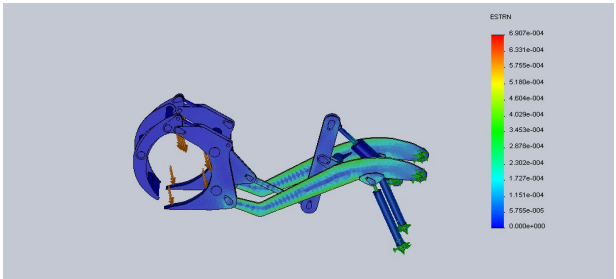


Рис. 4. Статической деформации в элементах конструкции технологического оборудования фронтального лесопогрузчика

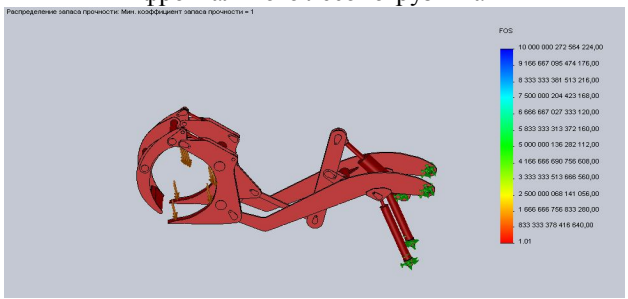


Рис. 5. Эпюра запаса прочности

Использование CAD, CAE систем помогает обнаружить и избежать ошибок ещё на стадии проектирования. Готовый чертеж или эскизный набросок не всегда даёт полного представления об объекте и не всегда можно наглядно оценить удобство стыковки деталей или узлов. Компьютерное моделирование позволяет рассмотреть вид проектируемого объекта с любой высоты, угла и местоположения, даёт возможность проанализировать поведение исполнительных элементов механизма в процессе эксплуатации, убедиться в работоспособности изделия, выявить все просчеты и неточности ещё на стадии проектирования, а не в процессе изготовления.

Литература:

1. Лешихина И.Е., Мальцева Е.Ю. Интерактивный обучающий курс для освоения подсистем инженерного анализа в современных САПР // Новые информационные технологии в образовании материалы VIII Международной научно-практической конференции. Российский государственный профессионально-педагогический университет. 2015. С. 96-100.

2. Хусамова А.З. Применение CAD/CAE - систем для анализа напряженно-деформированного состояния зубчатых редукторов // Автоматика. Информатика. 2008. № 1-2 (22-23). С. 45-46.

3. Полетайкин В.Ф. Проектирование специальных лесных машин: Учеб. пособие. – Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2011. – 282 с.

Application of systems of engineering analysis in the design of log loaders

Kolesnikov P.G.[1, a], Gordeev M.P.[1, b], Peshkov A.A.[1, c]

[1]Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev, Prospect Mira, 82, Krasnoyarsk, Russia
[a]mfsibgtu@mail.ru, [b]mp_gordeev@mail.ru, [c]peshkov94@inbox.ru

Keywords: CAE systems, three-dimensional modeling of engineering objects

The article deals with the design of technological equipment for the front loader using CAE-systems. 3D modeling and engineering analysis in modern machine-building production occupies a significant amount of the total labor costs of all stages of preparation of design documentation. Packages of three-dimensional solid-state parametric modeling used in design bureaus are diverse and multifunctional and allow not only to get a visualized representation of the final product in the form of a three-dimensional model at the design stage, but also to make the necessary list of research, engineering, and experimental works in order to minimize errors, reduce design time, optimize Parameters of the final object, reducing design costs, maximizing the economy Of the finished product. The process of designing the technological equipment of timber loader, presented in the article, gives the general necessary idea about modern approaches to the creation of new machine-building products.

УДК 621. 92

Электромеханическая очистка растворопроводов на Братском алюминиевом заводе

Баранов А.Н.[1a], Кутовенко М.В.[2], Янюшкин С.А.[2], Коренюгин К.В.[1]

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[2]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]baranov@istu.edu

Ключевые слова: Производство алюминия, газоочистка, трубопроводы, сульфаты, фториды, сода, зарастание, очистка

В производстве алюминия при мокрой очистке отходящих газов используется трубопроводы для перекачки растворов с высоким содержанием солей. При этом происходит интенсивное зарастание солевыми отложениями растворопроводов, что приводит к снижению эффективности газоочистки. Для очистки трубопроводных систем предлагается электромеханическая очистка. Удаление солевых отложений в трубе происходит в результате мощного электрического разряда в водном растворе, который протекает по трубопроводу. В статье описаны составы возможных отложений на стенках трубопроводов. В лабораторных условиях определены условия и режимы очистки трубопроводов. Подобрана частота, мощность импульса и марка кабеля, с помощью которого передается импульс в рабочую зону трубопровода, при котором происходит дробление и измельчение осадка и не повреждается защитная основа трубы. Предложена конструкция установки для эффективной электромеханической очистки трубопроводов в условиях Братского алюминиевого завода.

В настоящее время растворопроводы в цехе «Производства фтористых солей» (ПФС) Братского алюминиевого завода предназначены для подачи раствора кальцинированной соды на пенные аппараты, в которых происходит очистка газовых выбросов от фтористых и сернистых соединений электролизных цехов. Перекачка по трубопроводам растворов с высоким содержанием солей 2…4% кальцинированной соды (Na_2CO_3), 4…8% сульфата натрия (Na_2SO_4), 0,1…0,6% фторида натрия (NaF) приводит к зарастанию трубопроводов солевыми трудно растворимыми соединениями сложного химического состава, содержащие сульфаты, фториды, карбонаты и силикаты натрия, алюминия и кальция [1].

В состав участка фторсолей ДЭ входит 25 газоочистных сооружений. Для обеспечения нормальной работы пенных аппаратов необходима постоянная подача раствора в количестве 250…300м^3 в час. Трубопроводная система состоит из гуммированных труб диаметром 80мм (8,2км), диаметром 100мм (2,6км), диаметром 150мм (0,9км). Несмотря на применение гуммированных труб при закачке смешанного раствора на газоочистку, в растворопроводах происходит интенсивное зарастание солевыми отложениями за счет высокой концентрации солей. Скорость отложения осадка 7 см/год и в результате пропускная способность трубопровода снижается на 30% в квартал. Зарастание прямого растворопровода приводит к уменьшению объема содового раствора на орошение пенных аппаратов, что снижает эффективность работы газоочистки. Для полноты реакционного поглощения HF, SO_2 из газов приходится повышать концентрацию соды кальцинированной в растворе в 1,4 раза, при этом возрастает процесс высаливания на внутренней поверхности трубопроводов. Буферные емкости работают в непрерывном режиме и подача содового раствора на газоочистные сооружения завода осуществляется по растворопроводам, имеющих различную степень зарастания. Это приводит к тому, что система газоочистки становится разбалансированной. Основной задачей обслуживающего персонала является устранение зарастаний и восстановление пропускной способности либо путем монтажа временных схем подачи раствора по сборному трубопроводу и механической очисткой стационарного, либо полной его заменой. Кроме этого есть неработающие трубопроводы, у которых пропускная способность снижена на 50% и более, существующими способами восстановить их работоспособность невозможно. Скорость коррозии стали в растворах газоочистки составляет 0,0072 мм/год, что относит-

ся к стойким материалом и трубопроводные системы могут служить длительное время без замены, тем более что часть из них гуммирована полиэтиленом [2].

Отсутствие эффективных методов очистки трубопроводов приводит к значительным издержкам, связанным с сокращением получения вторичного криолита, увеличения износа насосного оборудования, безвозвратным потерям сырья и, самое главное, снижением степени очистки отходящих газов от электролизного производства.

По технологии, разработанной СибВАМИ, очистка трубопроводов проводится химическим способом путем промывки растворопроводов раствором с pH=9…10, на что расходуется ежегодно 192 тонны каустической соды и 212 тонн кальцинированной соды. Для промывки трубопроводов в УФС приготавливается смешанный раствор каустической и кальцинированной соды, который подогревается до 60^0С и транспортируется по растворопроводам. Затраты на сырье, используемое для очистки растворопроводов химическим способом составляют 2 млн. руб. в год. При этом увеличение пропускной способности трубопроводов достигает не более 15%, т.е. от нормативного объема раствора можно подать на газоочистку 80% растворов.

В Иркутском государственном техническом университете (ИрГТУ) освоена технология очистки трубопроводных систем электрогидроимпульсным методом. Удаление солевых отложений в трубе происходит в результате мощного электрического разряда в водном растворе, который протекает по трубопроводу. Подаваемый кратковременный разряд от специального источника тока напряжением в пределах 20…40 кВ вызывает электрическую дугу, в результате чего возникает мощная ударная волна с давлением до 600 Атм, что приводит к дроблению и измельчению осадка в трубах. Рабочим органом установки является коаксиальный кабель, по которому напряжение подается в зону разрушения отложений трубопровода.

В лабораторных условиях исследовалась возможность удаления осадка со стальной гуммированной трубы с внутренним диаметром 70 мм и сотложениями прочного осадка 15…25 мм на сторону. Проходное сечение трубы составляло менее 30 %. Стальная труба заполнялась водой из под крана. В трубу вводили кабель различных марок. Зазор между электродами на конце кабеля от 10 до 30мм [2].

В результате проведенных исследований установлено, что диаметр трубы, величина и твердость солевых отложении определяют мощность импульса, передаваемого в зону очистки. Подобрана частота, мощность импульса и марка кабеля, с помощью которого передается импульс в рабочую зону трубопровода, при котором происходит дробление и измельчение осадка и не повреждается защитная гуммировка трубы. [3-6].

Важным фактором надежности процесса очистки является обеспечение стабильности величины разряда в процессе продвижения зоны очистки по трубе. Большинство применяемых электрогидроимпульсных технологий предполагают сгорание рабочего кабеля под действием электрических разрядов с постоянными технологическими остановками для зачистки рабочего конца. При сгорании кабеля и изменении зазоров изменяется мощность импульсов, которые могут, как уменьшаться, что приводит к неполному разрушению отложений, так и увеличиваться, что приводит к повреждению внутреннего покрытия. Стабилизация зазоров на конце рабочего кабеля позволит не только обеспечить надежность процесса очистки, но и увеличить расстояние, очищаемое за один проход, что особенно важно при очистке работающих трубопроводов во время их кратковременной остановки [7-9].

При очистке труб большого диаметра или твердых отложений применяются достаточно дорогостоящие рабочие кабели и их расход значительно увеличивает стоимость очистки.

Разработаны конструкции специальных наконечников рабочего кабеля, позволяющих не только уменьшить расход кабеля в 5…10 раз, но и регулировать зазоры и задавать стабильные параметры разряда в процессе обработки. Спроектирован ряд приспособлений обеспечивающих также продвижение рабочего кабеля по трубе с заданной скоростью, за счет энергии получаемой при разряде. Для удаления осадка с прямолинейных участков растворопроводов одного диаметра длиной до 100м с зарастанием проходного сечения до 30%.

разработана технология удаление осадка с помощью шнековой установки, которая входит в комплект установки электромеханической очистки растворопроводов. По результатам проведенных работ составлен технологический регламент «Технология очистки растворопроводов ТР 01.07.-05.

Внедрение данной установки в полном объеме позволит получить значительный экономический эффект за счет снижения затрат сырья при химическом способе очистки трубопроводов и затрат при замене трубопроводов на новые. Реализация этой технологии позволит на 30% повысить производительность газоочистки за счет увеличения подачи растворов на газоочистку до 300 $м^3$/час. Это особенно актуально для БрАЗа в связи с тем, что повышается производство алюминия завода, снижается криолитовое отношение и объемы HF в отходящих газах из электролизеров возрастают. Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой электромеханической технологии восстановления растворопроводов составит 20,8 млн. руб. в год.

Литература:

1. Баранов А.Н., Янченко Н.И., Гусева Е.А. Технико-экономические и экологические аспекты извлечения серы в производстве алюминия: монография. – Иркутск: изд-во ИрГТУ, 2009. – 108 с.
2. Баранов А.Н., Гавриленко Л.В., Майзель И.Г., Тананайко А.В.. Новая технология очистки трубопроводов в газоочистке алюминиевых заводов // Алюминий Сибири-2004 г.: Сб. научн. Статей/ Красноярск: «Бона компании», 2004 г. С 297-298.
3. Баранов А.Н., Майзель И.Г., Тананайко А.В.. Электрогидроимпульсная технология очистки трубопроводов в газоочистке алюминиевых заводов с использованием торовых сепараторов // Торовые технологии: Сб. научн. Статей / Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004 г. С 118-120.
4. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация инструментальной подготовки в условиях действующего производства // В сборнике: Актуальные проблемы современного машиностроения. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Юргинский технологический институт. 2014. С. 42-46.
5. Способ получения композиционного хромоуглеродного покрытия // Баранов А.Н., Юдин А.Н., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Патент на изобретение RUS 2459018 20.07.2010.
6. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.
7. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface quality of the fiberglass composite material after milling // Applied Mechanics and Materials. 2014. Т. 682. С. 183-187.
8. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // Технология металлов. 2010. № 1. С. 25-33.
9. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.

Electromechanical cleaning of solution pipelines at the Bratsk Aluminum Smelter

Baranov A.N.[1a], Kutovenko M.V.[2], Yanyushkin S.A.[2], Korenyugin K.V.[1]

[1]Irkutsk National Research Technical University, st. Lermontova 83, Irkutsk, Russia
[2]Bratsky State University, Makarenko 40, Bratsk, Russia
[a]Baranov@istu.edu

Keywords: Aluminum production, gas cleaning, pipelines, sulfates, fluorides, soda, overgrowing, cleaning

In the production of aluminum for wet cleaning of waste gases, pipelines are used for pumping solutions with a high salt content. In this case there is an intensive overgrowth of salt deposits of solution pipelines, which leads to a decrease in the efficiency of gas cleaning. Electromechanical cleaning is offered for the cleaning of pipeline systems. Removal of salt deposits in the pipe occurs as a result of a powerful electrical discharge in an aqueous solution that flows through the pipeline. The article describes the compositions of possible deposits on the walls of pipelines. In the laboratory conditions and conditions for cleaning the pipelines. The frequency, the pulse power and the cable brand are chosen, with the help of which the impulse is transferred to the working zone of the pipeline, during which the crushing and grinding of the sludge occurs and the protective base of the pipe is not damaged. The design of an installation for efficient electromechanical cleaning of pipelines in the conditions of the Bratsk Aluminum Smelter is proposed.

УДК 621.891. 539

Оценка влияния режимов фрикционной обработки на характеристики наносимого покрытия

Гордеева Э.С.[a], Богуцкий В.Б.[b], Шрон Л.Б.[c]

Севастопольский государственный университет, Университетская 33, Севастополь, Россия
[a]eleonora.gordeeva@yandex.ru, [b]bogutskivb@yandex.ru, [c]shronlb@rambler.ru

Ключевые слова: финишная антифрикционная безабразивная обработка, покрытие, микротвёрдость, Технологическая среда

В статье решается задача оценки влияния режимов финишной антифрикционной безабразивной обработки на микротвердость нанесенного покрытия и его толщину. Показано, что микротвердость нанесенного покрытия и стальной поверхностей при применении рекомендуемых в литературе технологических режимов увеличивается с повышением удельного давления инструмента на поверхность обрабатываемой детали, шероховатость поверхности при этом не изменялась по сравнению с исходной. На толщину наносимого слоя в равной мере влияют величина продольной подачи и скорость скольжения. Для улучшения качества покрытия и повышения производительности процесса предложен состав технологической среды, применение которой позволило повысить скорость скольжения, продольную подачу и снизить необходимое удельное давление при обеспечении заданного качества наносимого покрытия. Толщина наносимого покрытия при этих условиях может быть увеличена.

Повышение надежности и долговечности машин является одной из основных проблем современного машиностроения. Статистический анализ, проведенный авторами [1, 2, 3, 4 и др.] показывают, что главной причиной выхода из строя машин является износ деталей подвижных сопряжений под влиянием сил трения. В связи с этим особое значение приобретает повышение износостойкости деталей технологическими методами, определяющими характеристики рабочих поверхностей. Среди используемых технологических методов достаточно широко применяется метод финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Стальные детали для предохранения от схватывания, улучшения приработки и повышения противозадирных свойств покрывают тонким слоем медного сплава (латуни или бронзы). Согласно [1, 2, 3, 4 и др.] для нанесения на поверхность детали слоя медного сплава толщиной 3…4 *мкм* рекомендуются следующие режимы: скорость скольжения инструмента из медного сплава по поверхности обрабатываемой детали $V=0,15…0,20$ *м/с*; удельное давление $p_u=100…120$ *MPa*; продольная подача $S=0,10…0,15$ *мм/об*, с подачей в зону нанесения покрытия технологической среды - глицерина ($C_3H_5(OH)_3$).

На основе анализа работ [1, 2, 3 и др.] можно сделать вывод, что исследования главным образом, сводились к выбору режимов нанесения покрытия на детали какого- либо конкретного узла, работающего в определенных условиях. Качеству получаемого покрытия и характеристикам поверхностного слоя детали, обрабатываемой методом ФАБО, должного внимания не уделялось. Исходя из этого, была поставлена задача оценки влияния режимов финишной антифрикционной безабразивной обработки на микротвердость нанесенного слоя и его толщину. Эксперименты проводились на образцах, изготовленных из стали 45, с использованием следующих режимов обработки: $p_u=40…120$ *MPa*, $V=0,1…1,5$ *м/с*, $S=0,05…0,3$ *мм/об*, наносимое покрытие сплав Л68. Нанесение покрытие осуществлялось с использованием разработанного приспособления [5], технологическая среда - глицерин. Микротвердость контролировалась на микротвердомере ПМТ-3, измерения толщины покрытия проводились на косых микрошлифах с использованием инструментального микроскопа ММИ.

Результаты проведенных экспериментов по изучению влияния режимов ФАБО на микротвердость нанесенного покрытия и его толщину представлены в виде графических зависимостей (рис. 1 и рис. 2). Кривые 1 и 2 (рис.1) отображают зависимость микротвердости

полученного покрытия и основного материала от удельного давления для стали 45. На рис. 2 представлены графические зависимости толщины нанесенного покрытия от режимов его нанесения.

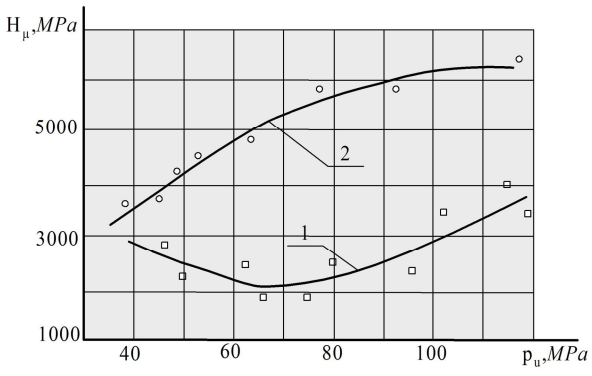


Рис. 1. Зависимость микротвёрдости нанесённого покрытия (1) и основного материала (2) от удельного давления при фрикционной обработке образцов из стали 45

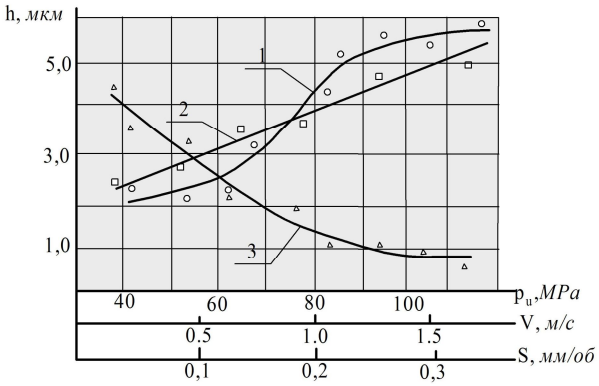


Рис. 2. Зависимость толщины покрытия стальных образцов от режимов обработки:
1 - удельное давление; 2 - скорость скольжения;
3 - продольная подача

Из представленных графиков видно, что микротвердость как нанесенного покрытия, так и стальной поверхностей увеличивается с повышением удельного давления инструмента из медного сплава на стальную поверхность выше 70 *MPa*, при этом шероховатость поверхности не изменилась по сравнению с исходной *Ra =0,8* мкм. На толщину наносимого покрытия в равной мере влияют как величина продольной подачи, так и скорость скольжения, с увеличением которых толщина наносимого покрытия увеличивается до 4…5 мкм.

С целью изучения возможности повышения производительности процесса ФАБО был расширен диапазон режимов нанесения покрытия: скорость скольжения принималась в пределах *0,20…2,0 м/с*; удельное давление *130…160 MPa*; продольная подача *0,20…0,35 мм/об*. Использование этих режимов, также как и отсутствие в зоне нанесения покрытия технологической среды, приводило к ухудшению характеристик наносимого слоя латуни. На поверхности образцов появились задиры, нарушалось такое важное требование к покрытию, как сплошность. Эксперименты показали, что при указанных условиях обработки интенсификация режимов не только не дает положительных результатов, но и ухудшает качество поверхности.

Для создания на поверхности стальной детали сплошного покрытия методом финишной антифрикционной безабразивной обработки необходимо, что бы трение инструмента из медного сплава о поверхность детали происходило при повсеместном схватывании поверхности стальной детали с материалом инструмента, налипание медного сплава на поверхность происходило не отдельными крупными частицами, а сплошным слоем, хорошо сцепленным с подложкой.

Для улучшения качества покрытия были проведены эксперименты по обработке стальных образцов с добавлением в технологическую среду 1% раствора *HCl* в качестве присадки в соотношении 0…15% весовых частей технологической среды. Процесс ФАБО осуществлялся при p_u*=50…110 MPa*, *V=0,20…2,0 м/с*, *S=0,05…0,30 мм/об* для образцов из стали 45 [6]. С точки зрения повышения производительности процесса и обеспечения качества покрытия наиболее эффективным показала себя технологическая среда, содержащая 90 весовых частей глицерина и 10 весовых частей 1% раствора *HCl*. Результаты проведенных экспериментов по изучению влияния режимов финишной антифрикционной безабразивной обработки на микротвердость наносимого покрытия и его толщину с использованием предлагаемой технологической среды представлены на рис.3 и рис.4.

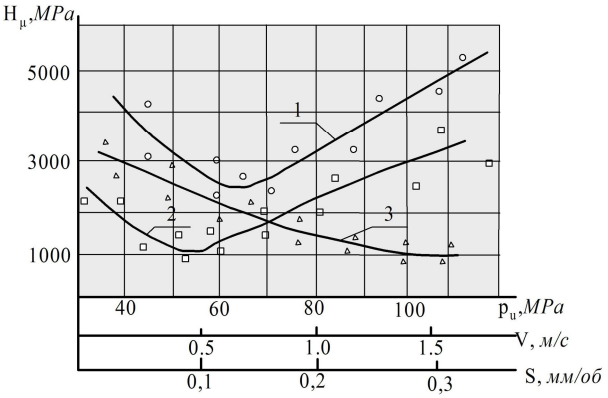


Рис. 3. Влияние режимов обработки на микротвёрдость покрытия: 1 - удельное давление; 2 - скорость скольжения; 3 - продольная подача

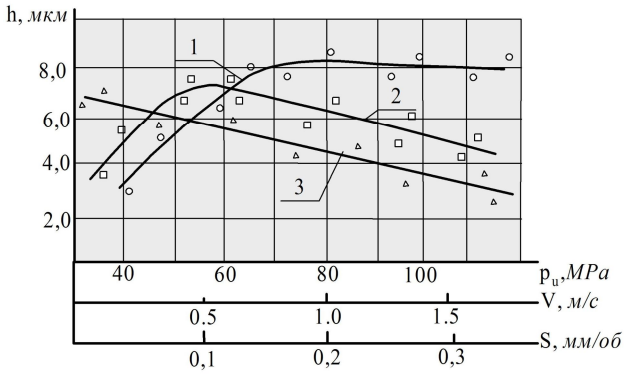


Рис. 4. Влияние режимов обработки на толщину покрытия: 1 - удельное давление; 2 - скорость скольжения; 3 - продольная подача

Применение предлагаемой технологической среды позволило повысить скорость скольжения до *1,4…1,6 м/с*, продольную подачу до *0,15…0,20 мм/об* и снизить необходимое для нанесения медного сплава удельное давление до *70…80 MPa*. Толщина наносимого покрытия при этих условиях может быть увеличена до *8 мкм*.

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы: микротвердость нанесенного антифрикционного покрытия определяется удельным давлением; шероховатость поверхности после финишной антифрикционной безабразивной обработки не отличается от исходной; предложенный состав технологической среды позволяет увеличить производительность процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки и толщину покрытия.

Литература:

1. Гаркунов Д.Н. Трибология на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.Г. Бабель. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. − 245 с.

2. Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения / Под ред.Д.Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982. – 207с.

3. Balabanov V.I. Application of friction nanoscale antifriction coatings on machine parts / V.I. Balabanov, V.Iu. Bolgov, S.A Ishchenko // Nanotechnology, ecology, production, № 3. 2010. P. 30-34.

4. Assenova E. Smart Coatings and Green Tribology / E. Assenova, G. Polzer, Dr. Tsermaa, M. Kandeva // World Tribology Congress, Torino, Italy, 2013. P. 1-4

5. Патент Украины № u2006 11891/13.11.2006. Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Малыгина В.В. Пристосування для фрикційно-механічного нанесення покриттів // Патент Украины № 23343. 2007. Бюл.№7.

6. Bogutsky V.B Influence of modes ANF on the characteristics of surface layer details/ V.B. Bogutsky, L.B. Shron, M.V. Piankovskay // The priorities of the world science: experiments and scientific debate: Proceedings of the XII International scientific conference. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2016. – P. 23-26.

Assessment the impact of the regimes of friction treatment on the characteristics of the applied coating

Gordeeva E.S.[a], Bogutsky V.B.[b], Shron L.B.[c]

Sevastopol State University, University st., 33, Sevastopol, 222053, Russian Federation
[a]eleonora.gordeeva@yandex.ru, [b]bogutskivb@yandex.ru, [c]shronlb@rambler.ru

Keywords: finishing it antifriction nonabrasive treatment, coating, microhardness, technological environment

The article solves the problem of an estimation of influence regimes finishing it antifriction nonabrasive treatment on the microhardness of the coating and its thickness. It is shown that microhardness of the coating and the steel surfaces at application recommended in the literature of technological regimes increases with resistivity pressure of the instrument on the surface of the workpiece, the surface roughness is not changed compared to the original. On the thickness of the layer applied equally affect the value of the longitudinal feed and the sliding speed. To improve the quality of the coating and improve process performance, offered composition of the technological environment, the use of which is allowed to increase the sliding speed, the longitudinal feed and reduce the required specific pressure while ensuring the required quality of the coating. The thickness of the coating under these conditions can be increased.

УДК 621.924.7

Модель образования тороидально-винтового потока в рабочей камере при ЦРО

Давыдова И.В., Золотопуп И.В., Гончаров М.О.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, Россия
http://www.donstu.ru

Ключевые слова: Центробежно-ротационная обработка, рациональный выбор

В статье раскрыты исследования центробежно-ротационной обработки деталей. В данной статье рассмотрен энергетический подход к образованию тороидально-винтового потока и обработке деталей в нем. Рассматривается модель подвода энергии для создания сложного тороидально-винтового движения среды в рабочей камере при центробежно-ротационной обработке деталей. Поток среды описывается уравнением Навье-Стокса и уравнением неразрывности. Приводятся основные характеристики процесса: напор, создаваемый вращающимся дном; мощность потока среды; окружная скорость переносного движения. Установлено, что энергия потока среды затрачивается на потери трения и расширение потока, на поворот потока, потери на удар, связанные с натеканием потока на стенки неподвижной обечайки под некоторым углом атаки и на соударение частиц среды. В статье приводятся зависимости, которые могут быть использованы для определения количественных закономерностей.

Центробежно-ротационная обработка (ЦРО) деталей применяется как за рубежом и в нашей стране. Этот метод обеспечивает высокую интенсивность обработки, устройства для его осуществления просты по конструкции, позволяют механизировать и автоматизировать процесс обработки, обладают широкими технологическими возможностями (рис. 1).

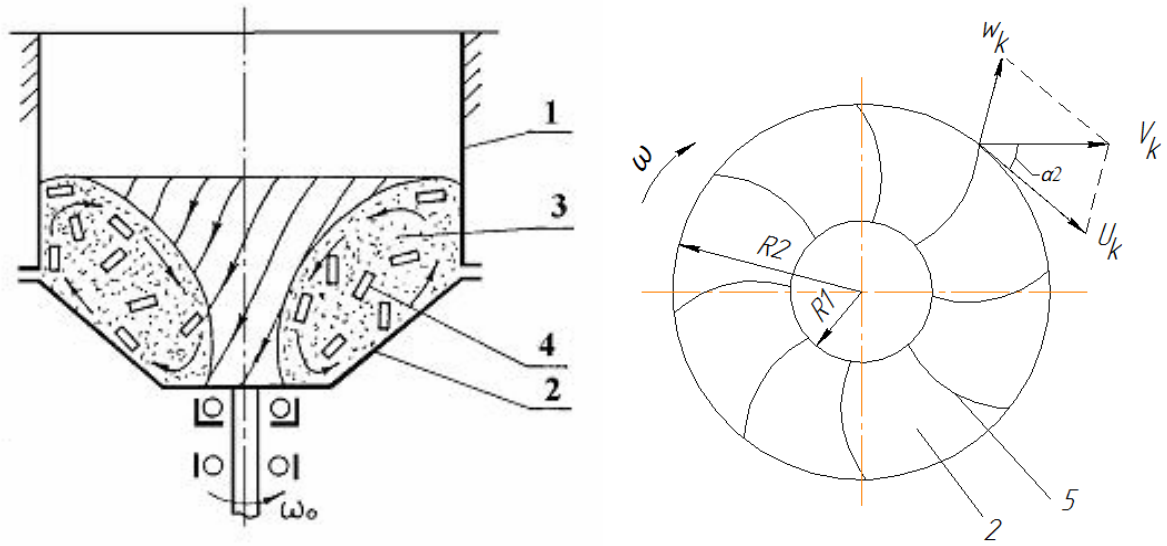


Рис.1. Схема центробежно-ротационной обработки деталей

В рабочую камеру, образованную неподвижной обечайкой 1 и вращающимся дном 2, размещают обрабатывающую среду 3 и обрабатываемые детали 4. Дну 2 сообщают вращательное движение, которое вовлекает всю массу загрузки в сложное тороидально-винтовое движение, в процессе которого происходит скольжение твердых частиц обрабатывающей среды по поверхности материала обрабатываемых деталей.

Поток среды можно считать осесимметричным, вязким и несжимаемым, который описывается уравнением Навье-Стокса и уравнением неразрывности:

$$\begin{cases} -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial Cx}{\partial x}=\frac{\partial Cx}{\partial t}+Cx\frac{\partial Cx}{\partial x}+Cy\frac{\partial Cx}{\partial y}+Cz\frac{\partial Cx}{\partial z}-\nu\left(\frac{\partial^2 Cx}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Cx}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 Cx}{\partial z^2}\right) \\ -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial Cx}{\partial y}=\frac{\partial Cy}{\partial t}+Cx\frac{\partial Cy}{\partial x}+Cy\frac{\partial Cy}{\partial y}+Cz\frac{\partial Cx}{\partial z}-\nu\left(\frac{\partial^2 Cy}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Cy}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 Cy}{\partial z^2}\right) \\ -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial Cx}{\partial z}=\frac{\partial Cz}{\partial t}+Cx\frac{\partial Cz}{\partial x}+Cy\frac{\partial Cx}{\partial y}+Cz\frac{\partial Cx}{\partial z}-\nu\left(\frac{\partial^2 Cz}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 Cz}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 Cz}{\partial z^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Cx}{\partial x}+\frac{\partial Cy}{\partial y}+\frac{\partial Cz}{\partial z}=0 \quad (2)$$

Вращающееся дно 2, как это следует по существу процесса ЦРО, выполняет функцию центробежного насосного колеса, которое сообщает всей массе загрузки вращательное движение вокруг вертикальной оси. В результате чего масса загрузки приобретает форму тора с движением отдельных частиц по винтовой траектории. Полагая, что вращающееся дно 2 снабжено лопатками 5, и вводя средние скорости потока $V_н$, $V_к$ на входе в насосное колесо и выходе с него, из уравнений (1) и (2) можно получить зависимость для давления насосного центробежного колеса

$$P=P_k-P_H+\rho\frac{V_k^2-V_H^2}{2}+\rho g(Z_K-Z_H) \quad (3)$$

где P_H, P_K – давление на входе и выходе с колеса; ρ – плотность потока; V_H, V_K – средняя скорость потока на входе и выходе с колеса; Z_H, Z_K – высота центра тяжести сечения входа и выхода потока.

Напор, создаваемый вращающимся диском, определяется

Зависимостью

$$Hg=\frac{P}{\rho g}, \quad (4)$$

и представляет собой энергию, сообщаемую единице массы потока среды, или разность удельных энергий среды на входе и выходе с вращающегося диска.

Мощность потока среды, создаваемая рабочим колесом, определяется зависимостью

$$N=Q\cdot\rho\cdot g\cdot H, \quad (5)$$

или

$$N=M\cdot\omega, \quad (6)$$

где Q – объемная подача среды насосного колеса; M – момент на валу вращающегося насосного колеса; ω – угловая скорость вращения насосного колеса.

Для реальных условий напор H и объемная подача Q для вращающегося диска меньше теоретических значений, так как следует учитывать потери энергии на трение, отсутствие лопаток у вращающегося дна 2.

Изложенный выше материал представляет собой модель подвода энергии для создания сложного тороидально-винтового движения среды 3 в рабочей камере. Обрабатывающаяся среда 3 с напором P_H и объемной подачей Q направляется на стенки вертикальной неподвижной обечайки 1, по внешнему радиусу R_2 поднимается на высоту h, затем, потеряв энергию, спадает вниз по внутреннему меньшему радиусу R_1 возвращается на вход насосного колеса, т.е. вращающегося дна 2 (см. рисунок). Так как у вращающегося дна 2 поток сходит со скоростью V_K под углом α_2 и является диагональю параллелограмма со сторонами ω_K, U_K, то весь поток приобретает винтовое движение. Здесь ω_K и U_K – относительная и окружная скорости переносного движения:

$$U_k=\frac{\pi n R_2}{30}, \quad (7)$$

где R_2 – радиус выхода потока с насосного колеса; n - частота вращения в минуту насосного колеса.

Съем материала с поверхности обрабатываемых деталей связан с затратами энергии. Энергия здесь представляет собой работу скольжения частиц обрабатывающей среды относительно поверхности детали, которая расходуется на пластические деформации, превращение в тепло и разрушение материала. Энергия потока среды затрачивается на потери трения и расширение потока, на поворот потока, потери на удар, связанные с натеканием потока на стенки неподвижной обечайки под некоторым углом атаки и на соударение частиц среды.

Таким образом, в настоящей статье рассмотрен энергетический подход к образованию тороидально-винтового потока и обработке деталей в нем. Зависимости, приведенные в ней, могут быть использованы для определения количественных закономерностей.

Литература:

1. Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольфштейн М. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. 224с.
2. Угинчус А.А. Гидравлика и гидравлические машины: учебник. М.: Аз-book, 2009. 395с.
3. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учебн. Для втузов. М.: Высш. шк., 2008. 415с.
4. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. Учебн. Для вузов. М.: Интеграл-Пресс, 2009. 603с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТЛ, 1954. 795 с.
6. Marciniak M. Wygladzarka rotacyjno-koskadowa do obrobki luznymi ksztaflkami sciernymi «Mechanik». 1973. s. 190-192.

The model of the formation of a toroidal-helical flow in a working chamber with centrifugal-rotary treatment

Davydova I.V., Zolotopup I.V., Goncharov M.O.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, pl. Gagarina, 1, Russia
http://www.donstu.ru

Keywords: Centrifugally-rotational treatment, rational choice

The article describes the research of centrifugal-rotational processing of parts. In this paper, we consider the energy approach to the formation of a toroidal-helical flow and the processing of parts in it. A model of energy supply for creating a complex toroidal-helical motion of a medium in a working chamber is considered in the course of centrifugal-rotational machining of parts. The medium flow is described by the Navier-Stokes equation and the continuity equation. The main characteristics of the process are as follows: the head created by the rotating bottom; Power of the medium flow; Circumferential speed of portable movement. It is established that the energy of the flow of the medium is expended on the friction loss and the expansion of the flow, on the rotation of the flow, the impact loss associated with the flow of the flow onto the walls of the fixed shell at a certain angle of attack and on the impact of the particles of the medium. The article gives the dependencies that can be used to determine quantitative patterns.

УДК 621.9

Выбор режима резания при ступенчато переменных параметрах процесса

Петрушин С.И.[1a], Губайдулина Р.Х.[1b], Сироджидинов Ш.А. [1c]

[1]Юргинский технологический институт Национального исследовательского Томского политехнического университета, ул. Ленинградская 26, Юрга, Россия
[a] psi@tpu.ru, [b]victory_28@mail.ru, [c]Sirodzidinovs@gmail.com

Ключевые слова: режим резания, стойкость режущего инструмента, ступенчато переменный режим резания, кривая износа

При мелкосерийном производстве на станках с ЧПУ один и тот же режущий инструмент используется на различных деталях или на разных участках одного и того же изделия. При этом существенно меняются значения параметров режима резания: подачи, глубины и скорости резания, что приводит к неопределённости в оценке суммарной стойкости лезвия инструмента и в установлении момента исчерпания им своих режущих свойств. В статье приведена разработанная методика расчета фактической суммарной стойкости режущих инструментов, эксплуатирующихся на станках с ЧПУ, при ступенчато переменном режиме резания. Получены выражения, позволяющие определять момент замены режущих инструментов, а также оптимизировать процесс резания по минимуму приведенных затрат в условиях ступенчато переменных режимах резания Приведены условия замены инструмента для различных видов обработки резанием: точение, сверление, фрезерование, рассверливание, зенкерование, развёртывание.

Введение. Мелкосерийное производство на станках с ЧПУ, как правило, осуществляется в условиях, когда один и тот же режущий инструмент используется на различных деталях или на разных участках одного и того же изделия. При этом существенно меняются значения параметров режима резания: подачи S, глубины t и скорости резания V. Это приводит к неопределённости в оценке суммарной стойкости лезвия инструмента и в установлении момента исчерпания им своих режущих свойств. В работе [1] предложено рассчитывать суммарную стойкость, как сумму основных технологических времён на каждом рабочем участке, и на этой основе определять момент замены затупившегося инструмента. Однако при переменном режиме резания такой подход неприемлем в связи с тем, что интенсивность изнашивания на том или ином участке различна. Попытаемся получить приближённое решение этой задачи.

Методика исследований. На í- том участке работы резания инструмент изнашивается согласно своей кривой износа (рис.1), которая при постоянном режиме резания, как известно [2], состоит из трёх участков: начального (приработки), нормального и ускоренного («катастрофического») изнашивания. Критерий износа (затупления) на этой кривой h_k соответствует началу третьего участка, а время непрерывного резания до достижения величины h_k представляет собой стойкость T_i лезвия инструмента. Линеаризуем данную кривую износа прямой линией, проходящей через начало координат и точку (T_i, h_k). Тогда имеем зависимость

$$h_k = C_i \tau \qquad (1)$$

где $C_i = h_k / T_i$ является функцией параметров режима резания.

Для ступенчато изменяемого режима резания суммарная линеаризованная кривая износа будет иметь вид ломаной линии (рис.2). Предположим, что через k рабочих участков, будет достигнут критерий затупления:

$$h_k = \sum_{i=1}^{k} \Delta h_i \quad , \qquad (2)$$

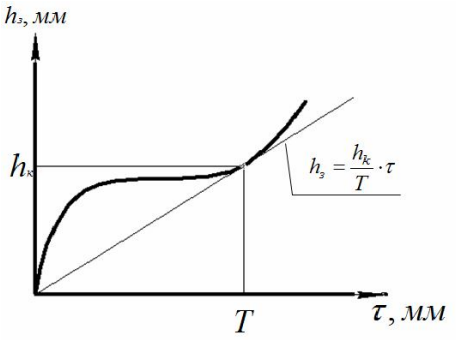


Рис. 1. Типовая кривая износа

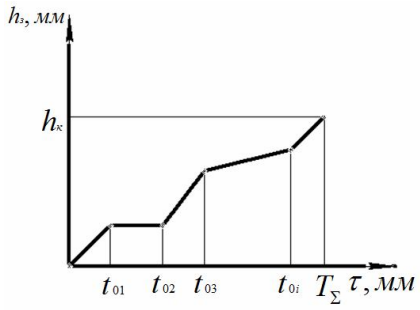


Рис. 2. Износ при ступенчато переменном режиме резания

при этом приращение линейного износа задней поверхности лезвия на i-том участке равно

$$\Delta h_i = t_{oi} C_i , \tag{3}$$

где t_{oi} – основное время резания на i - том участке без врезания и перебега инструмента.

Отсюда имеем:

$$h_k = \sum_{i=1}^{k} t_{oi} C_i . \tag{4}$$

С другой стороны (см. рис.2)

$$h_k = T_\Sigma C_\Sigma , \tag{5}$$

где T_Σ – суммарная стойкость режущего инструмента.

Приравняв (4) и (5), получим

$$C_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^{k} t_{oi} C_i}{T_\Sigma} . \tag{6}$$

Далее уточним содержание коэффициентов C_i в формуле (6). В выражении (1) величина C_i, как было отмечено выше, зависит от сочетания параметров режима резания на i-том рабочем участке. Воспользуемся развёрнутой стойкостной формулой Ф.У.Тейлора, которая для операции точения имеет следующий вид [3]:

$$T_i = \left(\frac{C_{Vi} K_{Vi}}{V_i t_i^x S_i^y} \right)^{1/m} . \tag{7}$$

где C_V – постоянная величина, соответствующая базовому сочетанию условий резания; K_V – поправочный коэффициент на измененные условия обработки по сравнению с базовыми; m – показатель относительной стойкости.

Из (1) и (7) получи

$$C_i = \frac{h_k}{T_i} = h_k \left(\frac{V_i t_i^x S_i^y}{C_{Vi} K_{Vi}} \right)^{1/m} . \tag{8}$$

Подставим (8) в (6) и преобразуем

$$C_\Sigma = \frac{h_k}{T_\Sigma} \sum_{i=1}^{k} \frac{t_{oi} V_i^{1/m} t_i^{x/m} S_i^{y/m}}{C_{Vi}^{1/m} K_{Vi}^{1/m}} . \tag{9}$$

Так как в выражении (9) отношение h_k / T_Σ равно C_Σ (см. формулу (5)), то выполнить это равенство можно, если ввести тождество

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{t_{oi} V_i^{1/m} t_i^{x/m} S_i^{y/m}}{C_{Vi}^{1/m} K_{Vi}^{1/m}} \equiv 1 . \tag{10}$$

Выражение (10) представляет собой условие, при выполнении которого лезвие токарного инструмента необходимо заменить на новое. Сумма основных времён, соответствующая этому условию, будет равна фактической суммарной стойкости. Аналогичные условия замены инструмента для других видов обработки резанием приведены в таблице.

Таблица

Вид обработки	Условие смены инструмента
Точение	$\sum_{i=1}^{k} t_{oi} \left(\frac{V_i t_i^x S_i^y}{C_{Vi} K_{Vi}} \right)^{1/m} = 1$
Сверление	$\frac{1}{D^q} \sum_{i=1}^{k} t_{oi} \left(\frac{V_i S_i^y}{C_{Vi} K_{Vi}} \right)^{1/m} = 1$
Рассверливание Зенкерование Развёртывание	$\frac{1}{D^q} \sum_{i=1}^{k} t_{oi} \left(\frac{V_i t_i^x S_i^y}{C_{Vi} K_{Vi}} \right)^{1/m} = 1$
Фрезерование	$\frac{z}{D^q} \sum_{i=1}^{k} t_{oi} \left(\frac{V_i t_i^x S_{zi}^y B_i^u}{C_{Vi} K_{Vi}} \right)^{1/m} = 1$

Примечание. D – диаметр инструмента; z – число зубьев фрезы.

Расчёты по этим формулам на основе данных справочника [2] показывают, что добиться выполнения приведенных условий замены изношенных режущих инструментов можно различными путями, варьируя маркой обрабатываемого материала, элементами режима резания и другими параметрами обработки. При этом значения суммарной фактической стойкости могут колебаться в широких пределах. Поэтому для получения удовлетворительных экономических показателей механической обработки на станках с ЧПУ при ступенчато переменном режиме резания необходимо ограничивать величину суммарной стойкости сверху. В случае использования традиционной методики выбора режимов резания таким ограничителем выступает нормативная стойкость $T_н$:

$$T_\Sigma \le T_н . \tag{11}$$

В оптимизационных методиках фигурирует так называемая экономическая стойкость $T_э$ и мы имеем дополняющее условие (10) выражение

$$T_\Sigma \le T_э . \tag{12}$$

В работе [4,5] авторами на основе анализа экономических показателей процесса резания и эксплуатации режущих инструментов предложено определять экономически обоснованный срок службы $T_э$ по формуле:

$$T_э = \frac{(1-m) t_{см} (1 + A_o)}{m(1 + A_э)} , \tag{13}$$

где $t_{см}$ – время смены и регулирования инструмента на размер, мин. Для станков с ЧПУ и многоцелевых – паспортная величина; A_o – доля текущих затрат на содержание и эксплуатацию оборудования в постоянной части общих приведенных затрат машиностроительной фирмы; $A_э$ – доля текущих затрат на электроэнергию в постоянной части общих приведенных затрат.

Применение выражений (12) и (13) совместно с условиями таблицы позволяет не только определять момент замены режущих инструментов, но и оптимизировать процесс резания по минимуму приведенных затрат в условиях ступенчато переменных режимах резания [6].

Выводы. В заключение отметим, что для современных систем ЧПУ не представляет большого труда ввести текущий пассивный контроль срока службы режущих инструментов с целью выдачи сигнала на смену затупившегося лезвия в соответствии с предложенной методикой.

Литература:

1. Тимирязев В.А., Костенко А.А., Макаренко А.П. Определение момента замены режущего инструмента на многоцелевых станках // Технология машиностроения. 2011, №2. С.23-25.
2. Childs T., Maekawa K., Obikawa T., Yamane Y. Metal machining: theory and applications. Wiley, NewYork. 2000. 354p.
3. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 // Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
4. Петрушин С.И. Экономически обоснованный срок службы режущих инструментов // Вестник машиностроения. 2007, №4. С.40 – 46.
5. Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х. Выбор оптимального варианта технологического процесса в машиностроении. Томск. Издательство ТПУ, 2015. 201с.
6. Heisel U., Storchak M., Krivoruchko D.V., Braun S. Modeling of interaction processes in cutting // Proceeding 2nd International Conference Process Machine Interactions. 2010. June, P. 10–11.

Selecting the cutting mode with step variables Process parameters

Petrushin S.I.[1a], Gubaidulina R.H.[1b], Sirodzhidinov Sh.A.[1c]

[1]Yurga Institute of Technology of National Research Tomsk Polytechnic Universit, 26 Leningradskaya st., Kemerovo Region, Yurga, 652000, Russian Federation
[a]psi@tpu.ru, [b]victory_28@mail.ru, [c]Sirodzidinovs@gmail.com

Keywords: cutting mode, durability of the cutting tool, step variable cutting mode, wear curve

In small-scale production on CNC machines, the same cutting tool is used in various parts or in different parts of the same product. At the same time, the values of the parameters of the cutting regime are significantly changed: feed, depth and cutting speed, which leads to uncertainty in the evaluation of the total resistance of the tool blade and in determining the moment when it exhausts its cutting properties. The article shows the developed methodology for calculating the actual total resistance of cutting tools operated on CNC machines with stepwise variable cutting conditions. Expressions are obtained that allow to determine the moment of replacement of cutting tools, and also to optimize the cutting process for a minimum of the resulted costs in conditions of stepwise variable cutting conditions. The conditions of the tool replacement for various types of machining are given: turning, drilling, milling, reaming, reaming, reaming.

УДК 621.9.06:004.45

Моделирование диагностики работоспособности станков с чпу

Аль-Джонид Х., Козлов А.М.

Липецкий государственный технический университет, ул. Московская, 30, Липецк, Россия
kaf-tmsi@stu.lipetsk.ru

Ключевые слова: диагностика, прогнозирование, нейро-нечеткие сети, метод Байеса, алгоритм фильтра частиц

Современные станки с ЧПУ имеют высокую стоимость, и их работоспособность значительно влияет на экономические показатели предприятия. В настоящее время диагностика оборудования проводится, как правило, при помощи анализа спектрограмм вибросигналов. В статье рассматривается возможность построения экспертной системы на основе нейросетевой технологии с описанием возможностей нейронных сетей, как инструмента практического решения прикладных задач в области диагностирования и прогнозирования неисправностей станков с ЧПУ. Предложенная модель построена на принципах гибридных нейро-нечетких сетей, функционирующих с использованием метода Байеса и алгоритма фильтра частиц. Использование модели позволит сократить затраты на техническую подготовку производства за счет прогнозной оценки работоспособности металлорежущего оборудования на этапе планирования технологических операций и разработки регламентов предупредительного обслуживания оборудования.

Введение. Задача моделирования систем диагностики и прогнозирования неисправностей станков с ЧПУ, является весьма актуальной, т.к. от работоспособности сложного и дорогостоящего оборудования зависит эффективность работы предприятия. Кроме того решение задачи позволит планировать время ремонта и закупок нового оборудования.

В настоящее время диагностика оборудования проводится, как правило, при помощи анализа спектрограмм вибросигналов, снятых в различных точках [1,2], используя которые можно прогнозировать лишь «постепенные отказы», когда на значения параметров установлен допуск, ограниченный верхним и нижним уровнями значений параметра. Кроме «постепенных отказов», необходимо учитывать возможные «внезапные отказы», причина возникновения которых связана не с изменением состояния объекта, а с неблагоприятным сочетанием действующих факторов. Вероятность возникновения таких отказов зависит только от величины промежутка времени и интенсивности отказов. Поэтому в данном случае для прогнозирования отказов следует применять методы математического моделирования.

Теория. Алгоритмы распознавания в технической диагностике основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве контролируемых параметров. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений (решающие правила).

Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса, занимает особое место благодаря простоте и эффективности. Как и другие, метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов и др. Однако в случаях, когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов. Метод основан на простой формуле Байеса $p(X_1..., X_n) = p(X_i \left| parents(X_i) \right.)$ [3, 4]. Метод Байеса позволяет «переставить причину и следствие»: по известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано данной причиной.

Нейросетевые модели являются мощным и гибким инструментом прогнозирования многомерных временных рядов, поскольку структура нейронной сети может быть изменена в зависимости от типа оборудования.

К недостаткам можно отнести необходимость наличия достаточно большого количества данных для обучения сети, что является затруднительным в случае, например, установки более нового оборудования.

Нейронные сети хороши для задач распознавания образов, но весьма неудобны для выяснения вопроса, как они такое распознавание осуществляют. Они могут автоматически приобретать знания, но процесс их обучения зачастую происходит достаточно медленно, а анализ обученной сети весьма сложен (обученная сеть обычно — «черный ящик» для пользователя). При этом какую-либо априорную информацию (знания эксперта) для ускорения процесса ее обучения в нейронную сеть ввести невозможно.

Системы с нечеткой логикой, напротив, хороши для объяснения получаемых с их помощью выводов, но они не могут автоматически приобретать знания для использования их в механизмах выводов. Необходимость разбиения универсальных множеств на отдельные области, как правило, ограничивает количество входных переменных в таких системах небольшим значением.

Системы с нечеткой логикой и искусственные нейронные сети эквивалентны друг другу, однако, на практике у них имеются свои собственные достоинства и недостатки [5, 6]. Данное соображение легло в основу аппарата гибридных сетей, в которых выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, но соответствующие функции принадлежности подстраиваются с использованием алгоритмов обучения нейронных сетей, например, алгоритма обратного распространения ошибки, использующего метод Байеса.

Структура предлагаемой экспертной системы, представляет собой гибридную структуру, интегрирующая в себе нейро-нечеткую сеть с алгоритмом динамической байесовской сети и алгоритмом фильтрации частиц на единой платформе. Метод основан на использова-

нии данных мониторинга, предоставляемых с помощью датчиков, установленных на станке с ЧПУ, чтобы проследить возникновение и эволюцию возникающих неисправностей узлов и механизмов.

Предлагаемая система может быть использована для оценки деформации любых металлорежущих инструментов, таких как резцы, сверла, фрезы, биты инструмента, вращающихся элементов и многих других.

Функционирование разрабатываемой единой платформы состоит из двух этапов: на первом происходит прогнозирование зарождения неисправностей «онлайн», второй этап проводит доскональную диагностику ошибок в «оффлайн» и «онлайн» модулях. На первом этапе нейро-нечеткий предсказатель используется для того, чтобы принять решение - начать ремонт по фактическому состоянию, или начать диагностику неисправностей на основе величины ошибки. Второй этап вступает в действие, только если развивающаяся ошибка выходит за рамки критического порогового значения, и, как следствие, запускается процесс диагностики неисправностей. Во время этой фазы метод Байеса и алгоритм фильтрации частиц используются как интеллектуальная система диагностики неисправностей для определения их величины, времени возникновения и локализации.

Целесообразность такого подхода была испытана в среде имитационного моделирования с использованием станка с ЧПУ.

В онлайн-модуле системы признаки неисправностей хранятся в интеллектуальных базах данных и постоянно подаются в нейро-нечеткий предсказатель, следовательно, это приводит к стадии прогнозирования неисправностей. Основной задачей этого этапа является принятие решения - следует ли продолжить обслуживание по фактическому состоянию или начинать диагностику неисправностей.

В ситуации, когда величина ошибки ниже определенного порогового значения, принимается решение прекратить обнаружение и классификацию неисправностей. В противном случае, если параметр ошибки выше предельных значений, то неисправность рассматривается как критическое состояние и дается команда для начала её диагностики.

Полученные результаты подводят к заключительной фазе, где экспертная система моделируется в вероятностных условиях с помощью динамической байесовской сети. Параметры вероятностной модели определяются в автономном режиме, и структура модели определяется путем изучения структуры дискретной байесовской сети.

Вероятностные отказы каждого станка, основанные на мониторинге, периодически обновляются, и байесовская сеть используется, чтобы определить инструменты или станки с высокой вероятностью отказа.

Результаты и обсуждение. Метод диагностики и прогнозирования неисправностей в станках с ЧПУ в данной работе был проверен на основе базы данных «Prognostic Data Challenge 2010» [7], в которой содержится библиотека диагностических признаков неисправностей высокоскоростного фрезерного станка с ЧПУ.

После того как создана база данных, моделирующая работу семи инструментов, этот файл открывается в Power Constructor для предварительного создания динамической байесовской сети, а затем информация экспортируется в растровый графический редактор Hugin для наглядного отображения процессов моделирования.

В структуре байесовской сети для станка с ЧПУ инструменты представлены дискретными переменными, а неисправности - как непрерывные переменные.

Были смоделированы 480 случаев вероятных неисправностей для инструмента под номером 1. На рис. 1 показана кривая развития неисправности инструмента 1 на основе прогнозирования. На рисунке 1 показано, что существует три стадии развития повреждения инструмента, и это подтверждает утверждение о том, что развитие неисправности инструмента или его повреждение предполагает кривую Гомпертца, где рост медленнее в начале и в конце периода. Она напоминает логистическую кривую, но не симметричную, а с более пологой правой частью, то есть замедление роста происходит не так быстро, как происходило его ускорение.

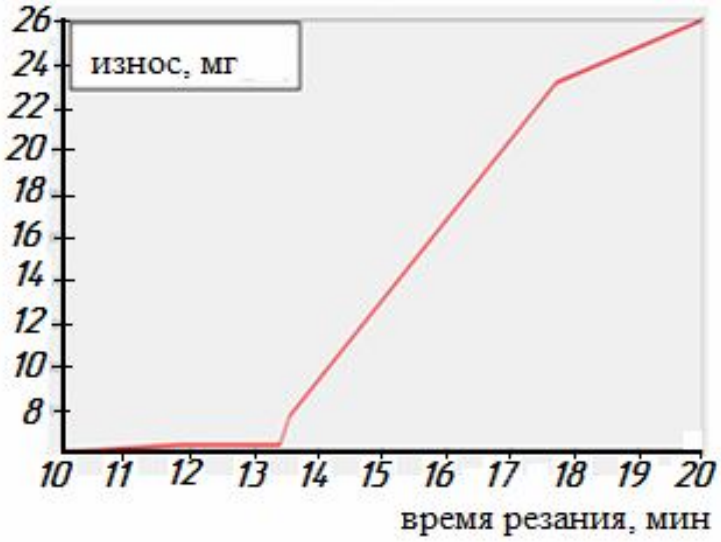


Рис.1. Кривая развития повреждений

На рисунке 2 показано предельное общее значение износа режущего инструмента 81.31% с остаточным ресурсом полезного использования инструмента (18,69%).

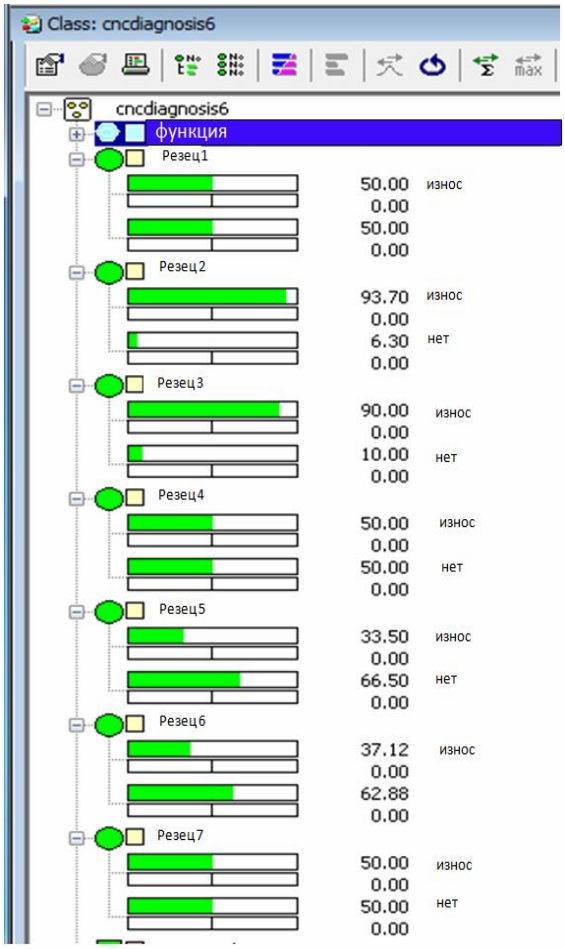


Рис. 2 Байесовская динамическая сеть для станка с ЧПУ

По результатам моделирования неисправностей была спрогнозирована поломка инструмента 1, как наиболее поврежденного инструмента с разрушением (износом) в 77.56 %.

Но, так как процент повреждения меньше, чем 81,31%, это означает, что инструмент 1 не находится в критическом состоянии и не нуждается в немедленном ремонте (или замене), он может работать и необходим дальнейший мониторинг развития повреждения.

Выводы. В работе описан новый подход к прогнозированию и диагностике неисправностей в универсальном станке с ЧПУ путем объединения идеи нейро-нечетких сетей с динамическими байесовскими сетями и алгоритмом фильтрации частиц на единой платформе. Основным вкладом в научную новизну является недавно предложенная модель классификации неисправностей станков с ЧПУ.

Установлено, что интегрированная экспертная система способна прогнозировать отказ инструмента с высоким уровнем повреждения до наступления критического предела, что позволит проводить ремонт станков с ЧПУ по фактическому техническому состоянию.

Разработанная с использованием предложенного подхода экспертная система может быть использована для прогнозирования работоспособности узлов и модулей конструкций станков. Это позволит сократить затраты на техническую подготовку производства за счет прогнозной оценки работоспособности металлорежущего оборудования на этапе планирования технологических операций и разработки регламентов предупредительного обслуживания оборудования. Ее подсистемы не зависят друг от друга и дают возможность совершенствовать их с применением различных алгоритмов в рамках подсистем, не затрагивая работу системы в целом.

Работа такой системы приведет и к повышению качества продукции.

Литература:

1. Козлов А.М., Кирющенко Е.В., Кузнецов С.Ф. Методика оценки колебаний системы при торцовом фрезеровании портативным оборудованием / Справочник. Инженерный журнал. – 2014, №7(208). – С.46-49.

2. A M Kozlov, E V Kiryuschenko and A V Khandozhko. The study of oscillations excitation patterns in the process of milling with portable equipment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012136 doi:10.1088/1757-899X/177/1/012136

3. Khawaja T. and Vachtsevanos G. A Novel Bayesian Least Squares Support Vector Machine based Anomaly Detector for Fault Diagnosis. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2009 (PHM 6 2009).

4. Tipping M. Sparse Bayesian learning and the Relevance Vector Machine. Journal of Machine Learning Research, 1(3):2116244, 2001.

5. E. Lughofer, E.P. Klement, J.M. Luja, and C Guardiola. Model-based fault detection in multi-sensor measurement systems. Intelligent Systems, 2004. Proceedings. 2nd International IEEE Conference,1:184 – 189, 22-24 June 2004

6. Седых, И.А., Поздняков А.И. Решение нечеткой задачи принятия решений при выборе марки телефона / И.А. Седых, А.И. Поздняков // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2016. − № 4(30). – С. 26-31.

7. PHM62008. Prognostics Data Challenge Dataset. NASA Ames Research Center. http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/prognostic6data6repository/

Modeling of diagnostics of operability cnc machines

AL-Jonid Khalid, Kozlov A.M.

Lipetsk State Technical University, 30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russia
kaf-tmsi@stu.lipetsk.ru

Key words: Diagnosis, Prognosis, Neuro-Fuzzy Networks, Dynamic Bayesian Network , Particle Filter algorithm (PF)

In the conditions of severe competition, the economic performance of an enterprise of any industry sector is significantly affected by the performance of CNC machines having a very high value. Technical diagnostics of equipment is currently carried out generally by means of an analysis of spectrograms of vibration signals. The paper describes the possibility of building expert system based on neural network technology, with the description of the capabilities of neural networks as a tool for practical solution of applied tasks in the areas of diagnosis and fault probabilistic forecasting of CNC machine tools. The offered model is based on a hybrid neuro-fuzzy networks functioning on the principles a Dynamic Bayesian Network with the use Particle Filter algorithm. Application of proposed model will reduce the costs of technical training for production by forecast estimation of metal-cutting equipment during the planning phase of the technological operations and development of preventative regulations of technical maintenance of CNC machine tools.

УДК 621.715.4

Разработкаконструкцииспециального приспособления для заточки расточного инструмента

Леонтьев И.А.[a], Демешко П.В.[b], Проскурин Р.С.[c], Герасимов Н.В.[d]

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия
[a]leontev@corp.nstu.ru, [b]petr-demeshko@mail.ru, [c]roma_proskurin@mail.ru, [d]gnv93@yandex.ru

Ключевые слова: заточноеприспособление, заточка инструмента, поворотный стол, твердый сплав, алмазное шлифование

В статье проведен анализ обрабатываемых поверхностей расточного инструмента для обработки внутренней поверхности головки тазобедренного сустава, определена необходимая кинематика проектируемого приспособления. На основе проведенного анализа предложена новая конструкция станочного приспособления для заточки представленного инструмента с учетом особенностей геометрии его режущей части. Данное конструктивное решение дает возможность обрабатывать инструмент на заточных станках с требуемой точностью. В работе также представлены схемы обработки инструмента и его ориентации вразработанном приспособлении. Разработанное приспособление позволяет осуществлять быструю настройку и надежное базирование инструмента с обеспечением необходимых требований по точности как линейных, так и угловых поверхностей. Применение специальнойоснастки при заточке инструмента позволяет уменьшить влияние человеческого фактора, а так же повысить производительность и качество обработки.

Введение. В настоящее время большинство керамических изделий изготовляются методами механической обработки - путем обработки режущими инструментами. Прогресс инструментального производства сопровождается непрерывным повышением требований к изготовлению режущих инструментов, что требует создания новых видов приспособлений и методов заточки. Зачастую, инструмент, представленный различными производителями не удовлетворяет тем или иным требованиям при обработке сложных поверхностей. Это, в свою очередь, требует создания специального режущего инструмента. Для изготовления такого инструмента требуется разработка специального заточного приспособления. Применение специальных приспособлений позволяет в значительной мере облегчить процессы формообразования, сборки, мойки и т.д.

Необходимость обработки керамических медицинских изделий ставит перед технологами несколько важных задач[1]. Одним из примеров таких задач является обработка внутренней поверхности головки тазобедренного сустава. Технологический процесс обработки, направленный на достижение требуемой точности и качества поверхности представлен в работе [2]. В данной работе спроектирован специальный расточной инструмент, в качестве материала для режущей части инструмента выбран твердый сплав ВК6. Традиционным методом размерной заточки инструмента из твердого сплава является алмазное шлифование (АШ) [3]. Обрабатываемость твердых сплавов шлифованием обратно пропорциональна их режущей способности: чем больше в них карбидов, тем хуже обрабатываемость. Быстрый или неравномерный нагрев и охлаждение приводят к образованию трещин и разрушению пластин.

Обсуждение результатов. Чертеж специального инструмента представлен на рис. 1. Предполагается, что заточка представленного инструмента будет проводиться на универсально-заточных станках. Качество заточки режущего инструмента в значительной степени определяет его стойкость, степень шероховатости и точность его поверхностей. Для повышения данных характеристик предлагается оснастить заточной станок специальным приспособлением. Применение такого приспособления при шлифовании на шлифовально-заточных станках существенно сокращает штучное время, а так же обеспечивает необходимую точность размеров.

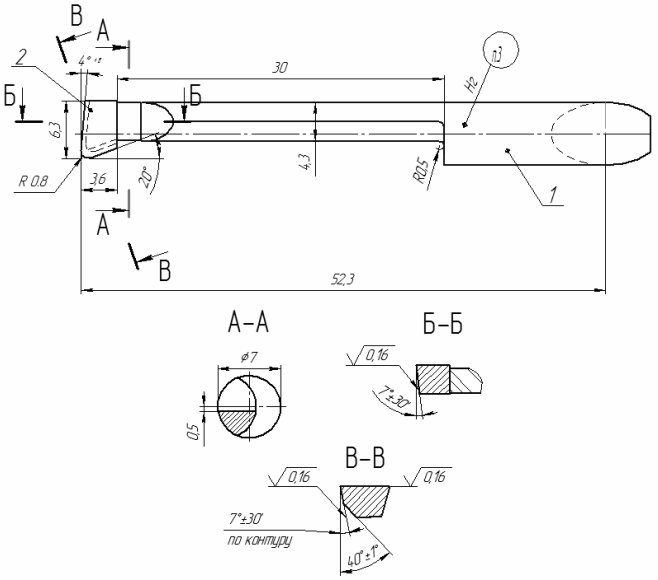


Рис. 1. Чертеж специального расточного инструмента

Анализ чертежадетали показал, что геометрия режущей части представляет собой совокупность плоскостей "А" и "Б" (рис. 2) и конуса "В" (рис. 2), расположенных под различными углами друг к другу. Это, в свою очередь, определяет кинематику проектируемого приспособления.

Обрабатываемые поверхности "А" и "Б" - плоские, расположенные под углом, "В" - конусная, образованная вращением вокруг оси z.

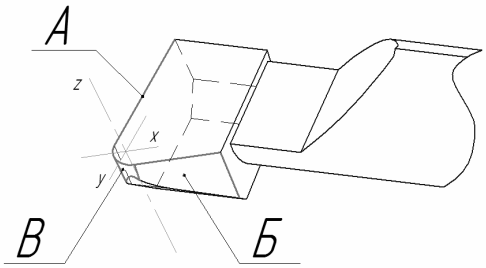


Рис. 2. Обрабатываемые поверхности

Схема установки инструмента. Для заточки плоскостей под углом применяется схема установки инструмента, представленная на рис. 3. Для получения конусной поверхности в приспособлении необходимо предусмотреть наличие поворотного механизма, ось вращения которого будет совпадать с осью конуса "В" (рис. 2).

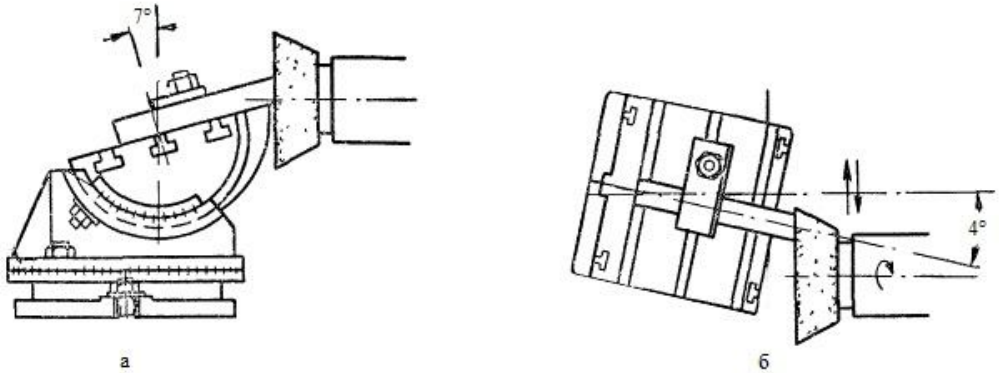


Рис. 3. Схема установки инструмента

В связи с этим, предложено разработать поворотный стол, приводимый в движение за счет червячной передачи. Стол, в свою очередь необходимо установить на угловую плиту. Данная плита обеспечивает установку оси вращения поворотного стола параллельно плоскости шлифовального круга.

Конструкция приспособления. Для ориентации инструмент устанавливается и фиксируется в державке, которая, в свою очередь, закрепляется в ползуне. Направляющие ползуна обеспечивают его перемещение по двум координатам одновременно. На узле закрепления инструмента установлен откидной упор (рис. 4) для точного выставления инструмента. На рис. 4 представлена конструкция узла закрепления инструмента.

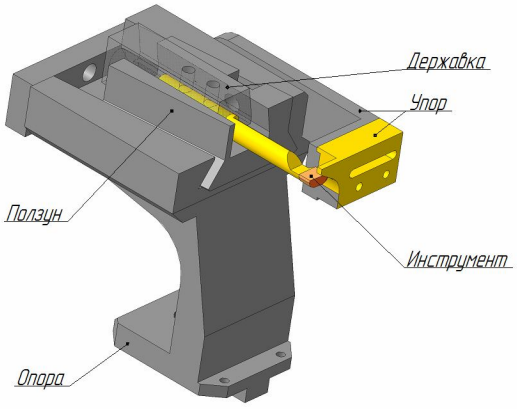


Рис. 4. Конструкция узла закрепления инструмента

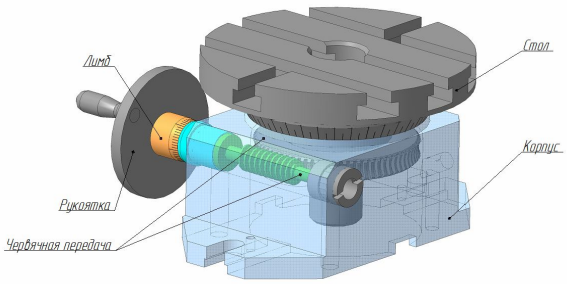


Рис. 5. Конструкцияповоротного стола

При обработке на круглом поворотном столе контур конусной поверхности образуется в результате круговой подачи стола, а точность получаемой поверхностизависит от правильной установки заготовки на столе. На рис. 5 представлена конструкция поворотного стола. Данный стол может иметь ручную или механическую круговую подачи. Угол вращения стола ограничивается упорами.

Узел закрепления инструмента устанавливается на поворотный стол и фиксируется на нем так, чтобы выдержать размеры "А" и "Б" относительно оси вращения стола. Упор узла закрепления (рис.6), связан с осью поворотного стола и позволяет точно выставить инструмент на заданный размер.

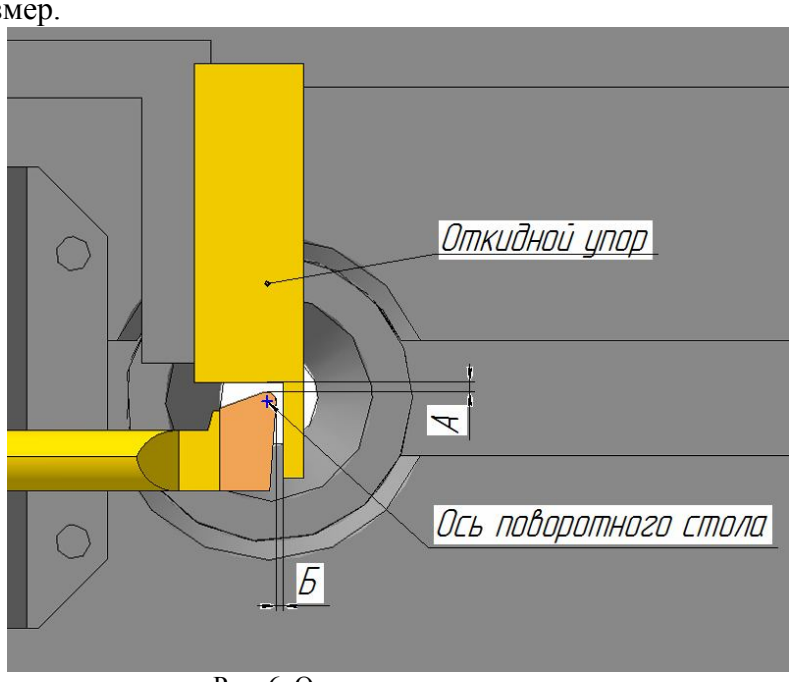


Рис. 6. Ориентация инструмента

На рис. 7 представлена полная конструкция специального приспособления для заточки расточного инструмента.

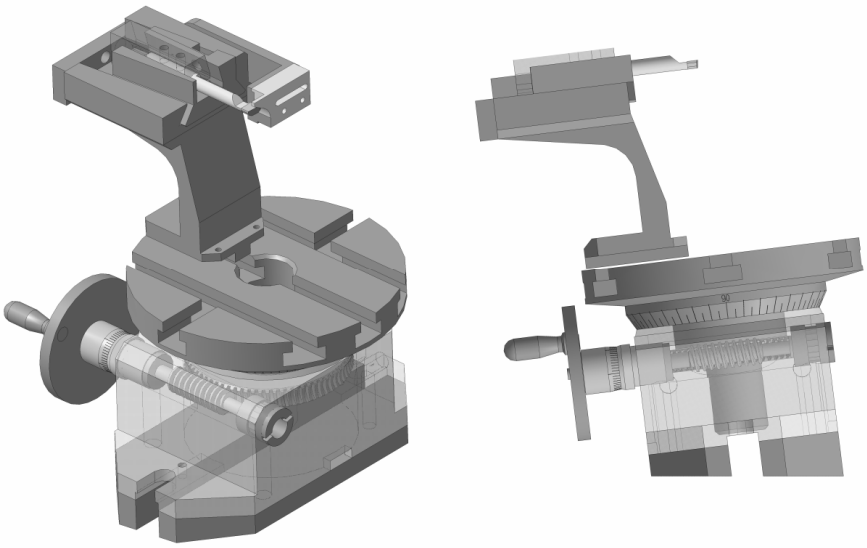


Рис. 7. Приспособление, установленное на угловую платформу

Схема движений при заточке инструмента на приспособлении представлена на рис. 8.

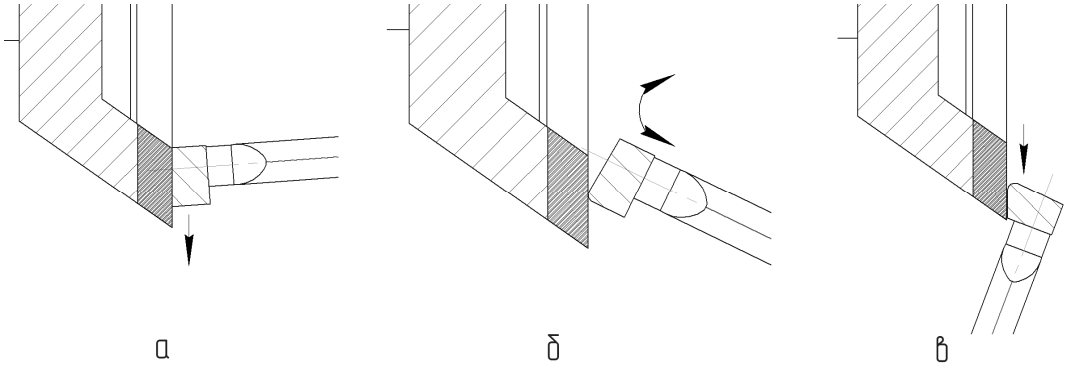


Рис. 8. Схема заточки инструмента:
а - обработка плоскости "А"; б - обработка конуса "В"; в - обработка плоскости "Б"

Выводы. Разработанное приспособление позволяет осуществлять быструю настройку и надежное базирование инструмента с обеспечением необходимых требований по точности как линейных, так и угловых поверхностей. Данное приспособлениеснижает влияние человеческого фактора на процесс обработки за счет наличия ограничивающих упоров, а так жепозволяет существенно повысить производительность.

Литература:

1. Рахимянов Х.М., ГаарН.П.,Белоусова Н.С., ЖуравлевА.И. Маркировка медицинских керамических изделий для имплантирования // В сборнике: Инновации в машиностроении труды 4-й Международной научно-практической конференции. 2013. С. 44-47.

2. Демешко П. В. Разработка маршрута технологической обработки внутренней поверхности керамической головки тазобедренного сустава / П. В. Демешко, К. С. Слывакова, А. В. Журавлева; науч. рук. Х. М. Рахимянов // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 3. – С. 308-309.

3. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимянов К.Х., Никитенко М.И. Электроалмазное шлифование твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 3. С. 9-13.

Designofaspecialdeviceforboringtoolgrinding

Leontyev I.A.[a], Demeshko P.V.[b], Proskurin R.S.[c], Gerasimov N.V.[d]

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]leontev@corp.nstu.ru, [b]petr-demeshko@mail.ru, [c]roma_proskurin@mail.ru, [d]gnv93@yandex.ru

Keywords: sharpening device, tool sharpening, rotary table, hard alloy metal, diamond grinding

The article analyzes the machined surfaces of a boring tool for processing the inner surface of the hip joint head, the necessary kinematics of the future device are also defined.According to the analysis, a new design of the tool sharpening device is proposed, taking into account the features of the geometry of the cutting tool.This constructive solution makes it possible to process the tool on grinding machines with the required accuracy.The work also presents the schemes of tool processing and its orientation in the developed device. Tool sharpening device allows for quick adjustment and reliable basing of the tool with the necessary requirements for the accuracy of both linear and angular surfaces.Usingof a special devices at sharpening allows to reduce the influence of the human factor, as well as to increase the productivity and quality of processing.

УДК 621.22

Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino

Ереско А.С.[1], Ереско С.П.[2], Ереско Т.Т.[3], Кукушкин Е.В.[4], Орлов А.А.[5]

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, Россия, 660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31.
eral@mail.ru[1], eresko07@mail.ru[2], ereskottt@mail.ru, ironjeck@mail.ru[4], sanneks1985@gmail.com[5]

Ключевые слова: тензорезисторы, измерение деформации, бесконтактный способ измерения, arduino

Был разработан модуль беспроводной передачи данных, состоящий из передатчика сигнала и приемника сигнала. Написаны программы в среде разработки arduino для модулей передачи и приема полученных деформаций с помощью тензорезисторов. Модуль измерения работает следующим образом: при измерении деформации с помощью тензорезисторов, электрический сигнал передается с модуля HX711 24-битный АЦП с усилителем на тензорезисторы, подключенных по мостовой схеме, возвратившийся измененный сигнал с тензорезисторов поступает на модуль HX711 24-битный АЦП с усилителем, после чего в цифровом виде подается на модуль Arduino nano 3, где обрабатывается и передается на модуль передатчика 2,4 ГГц NRF24L01. Модуль Arduino Mega 2560 принимает переданный сингнал с помощью модуля приемника NRF24L01. Модуль Arduino Mega 2560 передает данные на персональный компьютер, где они регистрируются и обрабатываются. Разработанный модуль измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino может применяться в испытательных стендах для передачи значений деформаций бесконтактным способом.

Задача исследований состоит в разработке модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino для испытательных стендов [1, 2, 3], которые позволят передавать полученные данные бесконтактным способом.

Был разработан модуль беспроводной передачи данных, состоящий из передатчика сигнала и приемника сигнала.

Передатчик сигнала (Рис. 1-2) включает в себя блок тензорезисторов соединенных по мостовой схеме; модуля Arduino HX711 24-битный АЦП с усилителем; модуля передатчика

(2,4 ГГц NRF24L01); элемента питания 3,7В; преобразователя электропитания на 5 В; модуля Arduino nano 3.

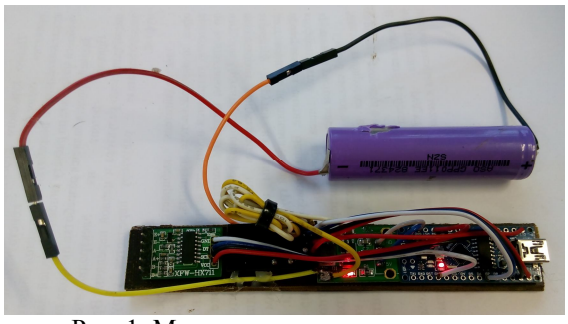


Рис. 1. Модуль передатчика сигналов

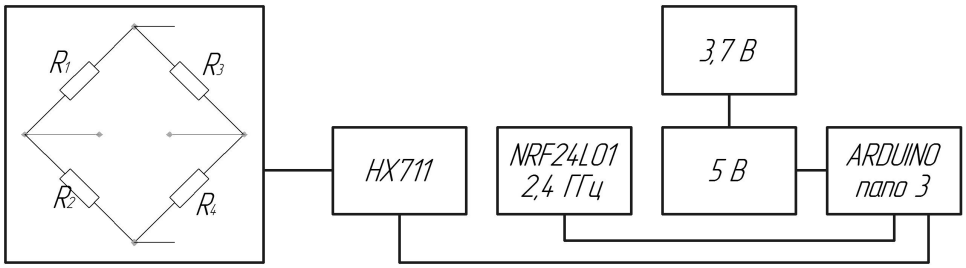


Рис. 2. Схема подключения элементов передатчика данных

Модуль АЦП HX711 24-бит [4] используется для тензодатчиков, весов, Arduino может использоваться в несложных проектах на микроконтроллерах, где нужно точно снимать показания с тензодатчиков. Практическое применение: создание бытовых весов, измерение силы на сервоприводах в 3D принтерах. АЦП HX711 поставляется в разобранном виде: штыревые разъемы 2,54 мм не припаяны к плате. Если есть потребность в штыревых разъемах, их нужно соединить с платой посредством пайки. Если такой потребности нет, можно монтировать линии связи прямо к клеммам. Потом нужно подключить АЦП HX711 к тензодатчикам (мостовая схема), к Arduino контроллеру (другому управляющему микропроцессорному устройству) и подать питание. АЦП HX711 имеет два разъема для подключения к тензодатчикам, для подключения к контроллеру и для подачи питания: разъем, обозначенный на плате J1, используется для подключения тензодатчиков.

Модуль Arduino Nano v3.0 (CH340G) построенный на микроконтроллере ATmega328 (Arduino Nano 3.0) или ATmega168 (Arduino Nano 2.x), имеет 16 кБ флеш-памяти для хранения кода программы, а микроконтроллер ATmega328, в свою очередь, имеет 32 кБ (в обоих случаях 2 кБ используется для хранения загрузчика). ATmega168 имеет 1 кБ ОЗУ и 512 байт EEPROM (которая читается и записывается с помощью библиотеки EEPROM), а ATmega328 – 2 кБ ОЗУ и 1 Кб EEPROM [5].

Модуль NRF24L01 позволяет связать приборы радиоканалом передачи данных [4]. С помощью NRF24L01 до семи приборов объединяются в общую радиосеть топологии звезда на частоте 2,4 ГГц. Один прибор в радиосети ведущий, остальные ведомые.

Для среды разработки arduino была разработана программа, которая загружена в модуль Arduino nano 3. Код программы в среде разработки arduino приведен в табл. 1.

Приемник сигнала включает в себя модуль приема данных NRF24L01 и модуль Arduino Mega 2560. Модуль Arduino Mega 2560 базируется на чипе ATmega2560 (Datasheet). Он имеет 54 цифровых котактов ввода/вывода (15 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 16 аналоговых входов, 4 UARTs (аппаратно последовательные порты), 16 МГц кварцевый генератор, подключение по USB, разъем питания, ICSP заголовок и кнопка сброса. Он содержит все необходимое для поддержки микроконтроллера, просто подключите его к компьютеру с помощью кабеля USB или к блоку питания, чтобы начать работать Arduino Mega 2560 совместима с большинством шилдов предназначенных для Arduino Duemilanove или Diecimila [6].

Для среды разработки arduino была разработана программа, которая загружена в модуль Arduino Mega 2560. Код программы в среде разработки arduino приведен в Табл. 1.

Модуль измерения работает следующим образом: при измерении деформации с помощью тензорезисторов, электрический сигнал передается с модуля HX711 24-битный АЦП с усилителем на тензорезисторы, подключенных по мостовой схеме, возвратившийся измененный сигнал с тензорезисторов поступает на модуль HX711 24-битный АЦП с усилителем, после чего в цифровом виде подается на модуль Arduino nano 3, где обрабатывается и передается на модуль передатчика 2,4 ГГц NRF24L01. Модуль Arduino Mega 2560 принимает переданный сингнал с помощью модуля приемника NRF24L01. Модуль Arduino Mega 2560 передает данные на персональный компьютер, где они регистрируются и обрабатываются.

Таблица 1

Код программы в среде разработки arduino

Модуль Arduino nano 3	Модуль Arduino Mega 2560

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
#include <HX711.h>
HX711 scale(A1, A0);
const uint64_t pipe = 0xF0F1F2F3F4LL;
RF24 radio(7, 8);
void setup(){
Serial.begin(9600);
scale.set_scale(2280.f);
scale.tare();
radio.begin();
delay(2);
radio.setChannel(9);
radio.openWritingPipe(pipe);
}
void loop()
{
int data = scale.get_units();
Serial.print(scale.get_units(), 1);
radio.write(&data, sizeof(data));
delay(100);
Serial.print("data: ");
Serial.println(data);
}
	#include <SPI.h>
	#include <nRF24L01.h>
	#include <RF24.h>
	const uint64_t pipe = 0xF0F1F2F3F4LL;
	int data;
	int num;
	RF24 radio(53, 48);
	void setup(){
	Serial.begin(9600);
	radio.begin();
	delay(1);
	radio.setChannel(9);
	radio.setDataRate(RF24_1MBPS);
	radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);
	radio.openReadingPipe(1,pipe);
	radio.startListening();
	}
	void loop()
	{
	if (radio.available()){
	radio.read(&data, sizeof(data));
	}
	Serial.print("torq: ");
	Serial.print(data);
	}

Разработанный модуль измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino может применяться в испытательных стендах для передачи значений деформаций бесконтактным способом. Кроме того, модуль HX711 с тензорезисторами может быть заменён на любые другие датчики, сигнал с которых можно будет получать в местах, труднодоступных для замера контактным способом.

Литература:

1. Ереско А. С., Ереско С. П., Ереско Т. Т., Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Орлов А. А. Расчет гидравлической системы тормозного устройства стенда для испытания трансмиссий транспортно-технологических машин / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. №4 с. 60-79. DOI: 10.15593/24111678/2016.04.06

2. Кукушкин Е. В., Ереско С. П., Ереско Т. Т., Меновщиков В. А., Орлов А. А. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках в широком диапазоне размеров с изменением угла излома карданной передачи / Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. №2 с. 58-73. DOI: 10.15593/24111678/2016.02.05

3. Кукушкин Е. В., Меновщиков В. А., Ереско Т. Т. Конструкция стенда для проведения испытаний карданных шарниров на игольчатых подшипниках // Решетневские чтения: материалы XIX Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2015. - с. 337-339.

4. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http://arduino-kit.ru/catalog/id/modul-priemoperedatchika-24-ggts-nrf24l01 (дата обращения: 18.02.2017).

5. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardNano (дата обращения: 18.02.2017).

6. Electronic textbook StatSoft [Электронный ресурс]. URL: http://wiki.amperka.ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B:arduino-mega-2560 (дата обращения: 18.02.2017).

Development of deformation measurement module by tenzoresistors using arduino

Eresko A.S.[1], Eresko S.P.[2], Eresko T.T.[3], Kukushkin E.V.[4], Orlov A.A. [5]

Reshetnev Siberian State Aerospace University, 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation.
[1]eral@mail.ru, [2]eresko07@mail.ru, [3]ereskottt@mail.ru, [4]ironjeck@mail.ru, [5]sanneks1985@gmail.com

Keywords: strain gauges, strain measurement, non-contact measurement method, arduino

A wireless data transmission module was developed, consisting of a signal transmitter and a signal receiver. Programs written in the arduino development environment for the transmission and reception modules of the deformations obtained with the help of strain gages are written. The measurement module operates as follows: when measuring deformation using strain gauges, an electrical signal is transmitted from the HX711 module to a 24-bit ADC with an amplifier on the strain gauges connected via a bridge circuit, the returned changed signal from the strain gauges is fed to the HX711 module by a 24-bit ADC with an amplifier, Which is digitally supplied to the Arduino nano 3 module, where it is processed and transmitted to the 2.4 GHz NRF24L01 transmitter module. The Arduino Mega 2560 module receives the transmitted sync via the NRF24L01 receiver module. The Arduino Mega 2560 module transfers data to a personal computer where they are registered and processed. The developed strain measurement module with the help of strain gages using arduino can be used in test benches for the transfer of strain values in a non-contact way.

УДК 621.22

Обзор вопросов по малоцикловой усталости игольчатых подшипников

Жабинская А.Н.[1], Кукушкин Е.В.[2], Меновщиков В.А.[3]

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, Россия, 660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31.
zhabinskaya_nastya@mail.ru[1], ironjeck@mail.ru[2], vladimirm@g-service.ru[3]

Ключевые слова: усталостные разрушения, пластичные деформации, напряжение в материале деталей

Был рассмотрены вопросы усталостных разрушений нагружаемого материала. Был проведен анализ методов решения проблемы. Была представлена информация об усталости металла и условия возникновения, было дано определения усталости, ее виды и образования. Наиболее существенным во всей приведенной работе, является то, что малоцикловая усталость игольчатого подшипника, процесс формирования усталостных трещин в материалах игольчатых подшипников карданных передач при малоцикловой усталости игольчатых подшипников является актуальным вопросом и требует дополнительных исследований в этом направлении. На основе проведенного анализа усталостных разрушений металла, было выявлено, что не все вопросы, касающиеся усталостных разрушений были исследованы и требуют дополнительного рассмотрения, на основе которого были поставлены следующие задачи: исследовать механизмы усталостного разрушения металла; исследовать процесс разрушения металла.

Введение. В наше время актуальна проблема усталостного разрушения металла, так как это одна из причин разрушения деталей машин и элементов конструкции. Если уровень переменных напряжений превышает некоторый предел, то в материале детали происходит процесс постепенного накопления повреждений, который приводит к образованию субмикроскопических трещин. По мере наработки длина этих трещин увеличивается, затем они объединяются, образуя первую микроскопическую трещину, под которой понимается трещина протяженностью 0,1…0,5 мм. У корня этой трещины возникает местное увеличение напряжений, которое облегчает ее дальнейшее развитие. Трещина, постепенно развиваясь и ослабляя сечение, вызывает в некоторый момент времени внезапное разрушение детали, которое нередко связано с авариями и тяжелыми последствиями. Это часто происходит в результате усталости материала. [1]

При малоцикловом изнашивании совместное действие нормальной и касательной нагрузок при трении приводит к тому, что максимальное касательное напряжение возникает не на поверхности, а под пятном контакта на небольшой глубине, где накапливаются повреждения и образуются трещины. У хрупкого материала трещина возникает на поверхности. Малоцикловое изнашивание наблюдается при пластическом деформировании поверхностей (без резания) более мягкого материала выступами более твердого. В местах такого деформирования нередко образуются боковые навалы, которые при последующих проходах тоже могут отделяться в виде продуктов износа.

Основная часть. Первоначально термин «усталость» означал, как поведет себя твердое тело под взаимодействием переменных напряжений, вызванных различными внешними нагрузками, то теперь «усталость» имеет более широкое значение.

Усталость металла бывает: термическая, коррозионная, повторно-статическая. Термическая усталость – это воздействие переменной температуры на твердое тело. Коррозионная усталость – это взаимодействие химически активных сред вместе с нагрузками. Повторно-статическая усталость – это взаимодействие небольшом количестве повторных статических нагружений, обычно превышающих предел текучести [1]. Для изучения усталости вводятся такие понятия как: усталость при ударных нагрузках, контактная усталость и т. д. так как усталостные разрушение металла не удается описать физическими законами все расчеты строятся на критериях, характеристиках, полученные опытным путем. Современные ученые считают, что усталостное разрушение зависит от уровня переменных напряжений в опасном сечении, от величин деформации, удельной энергии деформации, сообщаемой данной детали, времени нагружения в течение цикла, температуры, микроструктуры материала, из которого изготовлена данная деталь, среды, в которой она находится и т.п. На основе этих данных разработан ряд научных теорий усталостного разрушения. [2-11]

Уже при изготовлении детали из металла появляются различные дефекты как внутри этой детали, так и снаружи: мельчайшие включения, пустоты, межкристаллическое вещество, дефекты поверхностных слоев металла, особенности формы детали. Такие дефекты при нагрузке в ходе работы вызывают появление микротрещин, которые в дальнейшем растут и ослабляют сечение. [2] в ходе исследования этой проблемы ученые выявили, что разрушение происходить только из-за того что уже имеется микротрещина. Были установлены и пластичные деформации, появлявшиеся уже после первых нескольких тысяч циклов. Такие деформации проявляются в виде сдвигов. Причиной таких деформаций и разрушений является в неоднородности металла, и в том, что состоит он из множества кристаллических зерен разной величины и разной ориентации. Малые сдвиги, могут быть уничтожены при сжатии в следующий полупериод переменного напряжения. Но так же могут возникнуть новые сдвиги, в свою очередь уничтожаемые растяжением. такие сдвиги очень малы, но по мере их повторения они постепенно выступают, потому что сопровождаются разрушением. Таким образом, появляются первые микротрещины. [2] Другие ученые считают, что из-за полученных сдвигов возможны упрочнения, усталостная трещина зарождается там возрастающая величина местного напряжения достигнет уровня

прочности [3], так же имеется и третья точка зрения зарождения усталостных трещин. Исследователи считают, что в образовании присутствуют обе причины: упрочнение и разрыхление – это следствие циклическо-пластической деформации и действующие одновременно. А появление усталостных трещин в данном микрообъеме – это результат исчерпания пластических свойств. В этом случаи пластические деформации занимают большой объем по всему сечению, происходит хрупкое разрушение. [3]

В случае развития усталостной трещины от подповерхностного дефекта, она может соединяться с соседними микротрещинами. Траектория и скорость ее развития зависят от ориентировки лежащих вблизи микротрещин, а также от механических свойств соседних участков металла. Одновременно под поверхностью может развиваться несколько микротрещин. При циклическом нагружении та трещина, которая оказалась в условиях наиболее способствующих ее росту, достигает поверхности детали и затем происходит выкрашивание металла. Причем глубина выкрашивания от поверхностных концентраторов напряжений в несколько раз больше, чем от поверхностных дефектов.

Остро стоит вопрос по проблеме моделирования процессов малоцикловой усталости игольчатых подшипников. Известно большое количество феноменов, сопровождающих этот процесс, которые невозможно уложить в рамки какой-либо из предлагаемых теорий. К ним можно отнести термоактивируемое накопление повреждений, прирабатывание поверхностей при трении, цикличность изнашивания, кинетические фазовые переходы структур дефектов, физико-химическую и структурную модификацию материала поверхностного слоя и т. д.

Так как в процессе работы игольчатого подшипника развиваются огромные давления на фактических пятнах контакта, образование частиц износа при усталостном изнашивании игольчатых подшипников происходит только после множества циклов контактного взаимодействия, вызывая периодическое охрупчивание и диспергирование поверхностных слоев. С каждым контактом в поверхностном слое происходит необратимое изменение некоторого определяющего параметра, идентификация которого – необходимый шаг в поиске объективного критерия износостойкости материалов.

Усталостное разрушение поверхностного слоя происходит в игольчатых подшипниках, подвергающихся длительному нагружению переменными усилиями. Усталостные трещины возникают на поверхности трения, распространяются вглубь слоя. Постепенно удлиняясь, мелкие трещины образуют сетку на отдельных ограниченных или больших участках поверхности. При этом раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного материала.

Трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между основанием и слоем, впоследствии отдельные участки поверхностного слоя выкрашиваются. Выкрашивание крупных кусков поверхностного слоя сопровождается образованием поверхностных «язв», которые забиваются продуктами износа, действующими как абразив. Образование трещин повышает износ поверхностей трения, острые кромки производят режущее действие, а вблизи кромок происходит выкрашивание поверхности материала.

Циклически изменяющиеся контактные напряжения вызывают поверхностные разрушения в виде ямок выкрашивания, называемые питтингом. Образовавшиеся раковины размерами от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров увеличиваются в процессе работы узла трения, и возникает шелушение поверхности.

В своих работах И. В. Крагельский разработал уравнение для фрикционной усталости и развил фрикционно усталостную модель, в которой учитываются процессы на уровне влияния шероховатости поверхностей, при относительном скольжении трущихся тел происходит разрушение в результате многократного деформирования истираемого материала жесткими микронеровностями контртела [12-19].

Заключение. В заключение отметим, что наиболее существенным во всей приведенной работе, является то, что малоцикловая усталость игольчатого подшипника, процесс формирования усталостных трещин в материалах игольчатых подшипников

карданных передач при малоцикловой усталости игольчатых подшипников является актуальным вопросом и требует дополнительных исследований в этом направлении. На основе проведенного анализа [1-7] усталостных разрушений металла, было выявлено, что не все вопросы, касающиеся усталостных разрушений были исследованы и требуют дополнительного рассмотрения, на основе которого были поставлены следующие задачи: исследовать механизмы усталостного разрушения металла; исследовать процесс разрушения металла.

Литература:

1. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов. Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2001. - 61 с.
2. Капустянский Е. Н., Романовский Б.В., Викулов А.С. Расчет на усталостную прочность деталей машин с учетом использования различных теорий: Учебное пособие с грифом УМО АМ. –Изд. 2е., доп. и перераб. Пенза: Издво Пенз. гос. унта, 2003. –148 с.
3. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов, ч. 2, М., 1965.–480 с.
4. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин Н.Н., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении М.: Машгиз, 1959.—1118с.
5. Волков С.Д. Единая статистическая теория прочности твердых тел, тома 1, 11ХТФ, т. XXIII, вып.11, 1953.
6. Журков С.Н., Томашевский Э.Е. Зависимость прочности твердых тел, НТФ, Том XXIII, вып. 10, 1953.
7. Журков С.Н., Томашевский Э.Е. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения. К.Т.Ф. 1957, № 27.
8. Регель В.Р., Лексовский А.М. Сопоставление температурновременных зависимостей прочности твердых тел при статическом циклическом нагружениях. Сб. Прочность металлов при циклических нагрузках, Наука, 1967.
9. Коффин Л.Ф. О термической усталости сталей. В кн. ‘’Жаропрочных сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях’’. Под редакцией Л.Б. Гецова и Таубиной М.Г.: М., Госэнергоиздат, 1960.с.188 – 258.
10. Гусенков А.П., Паршинцева Т.С., Шнейдерович Р.М. Иев. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроения, 1960, № 5.
11. Мороз Л.С., Петрик В.М., Романов С.Б. О критериях малоцикловой усталости / Прочность материалов: Труды СЭПИ № 16, Л., 1971.
12. Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А., Ереско Т.Т. Анализ современных представлений и подходов при исследовании усталостных разрушений игольчатых подшипников // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 287-288.
13. Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А., Ереско Т.Т. Анализ современных представлений и подходов при исследовании усталостных разрушений игольчатых подшипников // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф.: в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 287-288.
14. Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А. Малоцикловая усталость игольчатого подшипника // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы IX Всерос. науч.- практ. конф. : в 2 т. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. С. 154-155.
15. Ереско Т.Т., Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А. Современное состояние вопроса по исследованию пластического деформирования при статическом контактном нагружении игольчатых подшипников / Механики XXI веку: материалы X Всерос. с межд. участием науч.- техн. конф.; Братск: БрГУ, 2014, с. 37-40.
16. Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А., Ереско Т.Т. Вопросы формирования усталостных трещин в материалах игольчатых подшипников карданных шарниров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы X Всерос. науч.- практ. конф. : в 2 т. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. с. 148-150.
17. Губанова А.В., Кукушкин Е.В., Маслова О.Е., Меновщиков В.А. Влияние механических и термических способов поверхностного упрочнения деталей на их усталостную контактную прочность карданных шарниров на игольчатых подшипниках // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 403-405.
18. Ереско Т.Т., Жабинская А.Н., Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А. Взаимосвязь первичных усталостных разрушений с дислокацией циклически повторяющихся или чередующихся напряжений карданных шарниров // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. С. 409-411.
19. Меновщиков В.А. Ереско С.П. Исследование и совершенствование игольчатых подшипников карданных передач транспортно-технологических машин. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2006. – 283 с.

Review of questions on small-cycle fatigue of needle bearings

Zhabinskaya A.N.[1], Kukushkin E.V.[2], Menovshikov V.A.[3]

Reshetnev Siberian State Aerospace University, 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
zhabinskaya_nastya@mail.ru[1], ironjeck@mail.ru[2], vladimirm@g-service.ru[3]

Keywords: fatigue failure, plastic deformation, stress in the material of parts

The problems of fatigue failure of the loaded material were considered. An analysis of methods for solving the problem was carried out. Information was provided on the metal fatigue and the conditions of occurrence, the definition of fatigue, its types and formation was given. The most significant in the whole of the above work is that the low-cycle fatigue of the needle bearing, the process of fatigue cracks forming in the materials of needle bearings of cardan gears with low-cycle fatigue of needle bearings is an urgent issue and requires additional studies in this direction. Based on the analysis of fatigue fractures of metal, it was found that not all issues related to fatigue damage were investigated and require additional consideration, on the basis of which the following tasks were set: to investigate the mechanisms of fatigue destruction of metal; To investigate the process of metal failure.

УДК 621.873

Способ управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана и устройство для его осуществления

Редькин А.В.[1,a], Орлов А.И.[1,a], Ильин В.С.[1,a]

[1]Тульский государственный университет, пр. Ленина, 92, г. Тула, 300012, Россия
[a]ptm@tsu.tula.ru

Ключевые слова: грузоподъемная машина, безопасность, устойчивость, управление, мониторинг

Задачей исследований является повышение производительности и уровня безопасности погрузочно-разгрузочных работ, выполняемых с привлечением мобильных грузоподъемных машин и предоставлении легко воспринимаемой информации оператору о текущей устойчивости системы в реальном масштабе времени в условиях непрерывного технологического процесса погрузочно-разгрузочных работ. Способ управления грузоподъемным краном заключается в том, что путем воздействия на органы управления краном производится запуск и отключение приводов механизмов, перемещающих оборудование крана, путем обработки сигналов датчиков, контролирующих положение подвижного оборудования. Отключение приводов механизмов по фактору перегрузки производится путем обработки сигналов датчиков, контролирующих положение подвижного оборудования крана и его нагрузку для снижения уровня раскачивания груза, вызванного инерционными силами в начале движения и при останове. Способ предусматривает установку дополнительного датчика длины каната и переключателя кратности полиспаста, сигналы которых используются для определения высоты подвеса груза и периода раскачивания груза.

Основной задачей создания системы контроля грузовой устойчивости является повышение производительности и уровня безопасности погрузочно-разгрузочных работ, выполняемых с привлечением мобильных грузоподъемных машин и предоставлении легко воспринимаемой информации оператору о текущей устойчивости системы в реальном масштабе времени в условиях непрерывного технологического процесса погрузочно-разгрузочных работ [1, 2].

Подобный подход реализован в системе [3], которая работает следующим образом. Бортовой микропроцессор выполнен с возможностью периодического определения положения проекции центра масс на плоскость опорного контура относительно ребра опрокидывания в пределах опорного контура системы, выявляет направление смещения проекции центра

масс за пределы области гарантированной устойчивости, генерирует сигнал опасного снижения запаса устойчивости и формирует направленное воздействие стабилизирующего характера для ограничения скоростей или блокирования перемещения технологического оборудования. Однако, для реализации такой системы требуется большое количество измерительных приборов и дополнительные гидрораспределители.

Способ управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана [4] предполагает включение датчиков давления в гидролинии выносных опор и заключается в следующем.

1. Осуществляется вычисление грузового момента и сравнивается с предельнодопустимым.

2. В зависимости от полученных данных формируют сигнал включения тех исполнительных механизмов, которые обеспечивают уменьшение грузового момента.

2. Дополнительно измеряются скорости изменения давления в гидроцилиндрах выносных опор и определяется их знак.

4. Составляют контрольные комбинации скоростей изменения давления, которые сравнивают с эталонными.

5. В зависимости от совпадения или несовпадения полученных контрольных комбинаций с эталонными формируют сигнал управления параметрами, влияющими на устойчивость.

Расчетная схема вычисления грузового момента приведена на рис. 1.

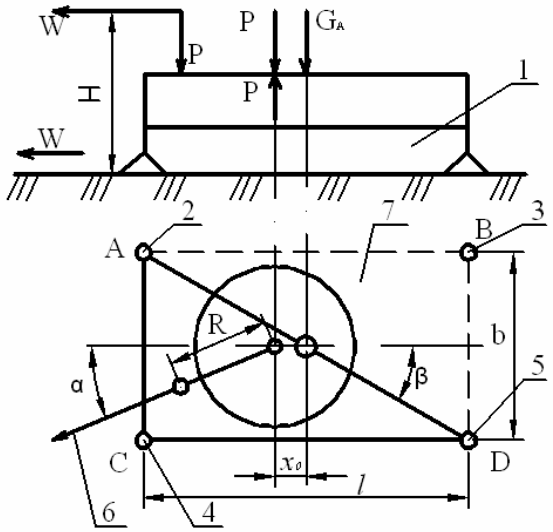


Рис. 1. Расчетная схема опорной плоскости крановой установки:
1 – схема приложения сил; 2, 3, 4, 5 – опорные гидроцилиндры,
воспринимающие основную нагрузку; 6 – телескопическая стрела;
7 – опорный контур

Устройство для осуществления способа управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана содержит гидролинию выносных опор, механизм поворота стрелы, аналого-цифровой преобразователь, бортовой микропроцессор, в память бортового микропроцессора введена математическая модель мобильного грузоподъемного крана, выполненная с возможностью изменения в зависимости от типа грузоподъемной крана. В гидролинию выносных опор дополнительно включены датчики давления, бортовой микропроцессор имеет связь с датчиками давления, механизм поворота стрелы снабжен регулируемым аксиально-поршневым гидродвигателем.

После включения главного гидрораспределителя становится возможным включение гидрораспределителей, с помощью которых создается давление в опорных гидроцилиндрах, и крановая установка вывешивается, с помощью датчиков давления определяется изменение давлений P_A, P_B, P_C, P_D в полости гидроцилиндров при трансформации опорного контура 7, при помощи бортового микропроцессора определяется скорость изменения давления.

На расчетной схеме (см. рис. 1) видно, что при данном положении телескопической стрелы крана 6 основная нагрузка воспринимается трехопорным контуром 7, вершинами которого являются гидроцилиндры 2, 4, 5 (A, C, D). Вес стрелы 6 с грузом, перенося его в центр вращения поворотной части крана, образует пару сил и создает опрокидывающий момент.

Нагрузки на опоры будут составлять:

$$A = \frac{G_{\text{н}}}{2} + \frac{P}{2} - M \cdot \frac{\sin \alpha}{b},$$

$$C = P\frac{x_0}{l} + M\left(\frac{\cos \alpha}{l} + \frac{\sin \alpha}{b}\right),$$

$$D = \frac{G_{\text{н}}}{2} + \frac{P}{2}\left(1 - \frac{2x_0}{l}\right) - M \cdot \frac{\cos \alpha}{l},$$

где $M = P \cdot R + W \cdot H$.

При моделировании процесса выполнения грузоподъемных операций, как правило, рассматривается трехопорный контур, четвертая опора в данном случае является ненагруженной.

Считая, что вывешивание рамы базовой машины осуществляется за счет создания необходимого давления в полостях гидроцилиндров выносных опор, при нормальном функционировании эталонная комбинация текущих значений изменения скоростей давления в опорах при подъеме или перемещении груза будет соответствовать положению стрелы следующим образом:

$$\frac{\partial P_A}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_C}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_D}{\partial t} < 0,$$

где $\frac{\partial P_A}{\partial t}, \frac{\partial P_C}{\partial t}, \frac{\partial P_D}{\partial t}$ скорости изменения давления в полостях гидроцилиндров ACD – контура.

Такая комбинация будет считаться эталонной для соответствующего положения стрелы относительно опор.

Для реализации поставленной задачи управления устойчивостью крана во время работы наиболее целесообразным является применение способа определения грузовой устойчивости крана по изменению скоростей давления в гидроцилиндрах выносных опор относительно рассмотренного опорного контура.

В этом способе учитываются также дополнительные воздействия на кран: силы инерции, ветер, уклон рабочей площадки и др., а численное значение коэффициента грузовой устойчивости крана определяется по формуле:

$$k = \frac{M_{\text{уд}}}{M_{\text{оп}}} \geq 1{,}2,$$

где $M_{\text{уд}}$ – удерживающий момент крана; $M_{\text{оп}}$ – опрокидывающий момент, созданный весом груза и весом стрелы.

В процессе поворота стрелы треугольный опорный контур меняет третью вершину треугольника (опору) и в эталонной комбинации учитываются скорости изменения давления нового опорного контура. Одновременно с этим следящая система контролирует горизонтальное положение опорной рамы.

Накапливая в процессе выполнения грузоподъемных операций данные о значениях этих величин система управления с определенной вероятностью может судить о дальнейшем их изменении.

Если при подъеме или маневре стрелы с грузом система управления фиксирует, что

$$\frac{\partial P_A}{\partial t} < 0,\ \frac{\partial P_C}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_D}{\partial t} < 0,$$

или

$$\frac{\partial P_A}{\partial t} < 0,\ \frac{\partial P_C}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_D}{\partial t} = 0,$$

то можно считать создание предпосылок ненормального функционирования или аварийной ситуации. Создается угроза опрокидыванию ГПМ, для предотвращения которой подается сигнал машинисту, и, если не последовало никакой реакции, система управления медленно останавливает поворот, блокирует возможность движения в эту сторону. Машинисту дается возможность уменьшить опрокидывающий момент, тем самым снизить нагрузку на аварийную опору. Это может достигаться уменьшением вылета стрелы, увеличением угла наклона стрелы к горизонту, т.е. уменьшением расстояний от центра тяжести крановой установки до центров тяжести стрелы и груза, что влияет на воспринимаемые выносными опорами нагрузки.

Выбрав изменение давления в гидроцилиндрах выносных опор за контролируемый параметр, легко показать, что максимальное значение коэффициента устойчивости будет в том случае, пока соблюдается условие нормального функционирования или эталонная комбинация:

$$\frac{\partial P_A}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_C}{\partial t} > 0,\ \frac{\partial P_D}{\partial t} < 0.$$

Если скорость изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре не начнет изменяться в сторону увеличения или изменения знака на положительный, а продолжит оставаться неизменным, то поворот стрелы будет возможен только в сторону разгрузки аварийной опоры.

Постоянный контроль параметров, определяющих устойчивость крана, осуществляется датчиками давления, сигналы с которых поступают на аналогоцифровой преобразователь с целью представления в удобную для обработки форму.

Обработка поступающей информации осуществляется с помощью микропроцессорного модуля на базе микропроцессора с постоянным запоминающим устройством и оперативным запоминающим устройством.

Реализация исполнительной части требует минимальной модернизации конструкции гидравлического оборудования механизма поворота стрелы (установка регулируемого аксиально-поршневого гидродвигателя) и гидравлического оборудования опорного контура (оснащение датчиками давления).

Вопросам обеспечения устойчивости стреловых кранов в условиях ненормированных внешних воздействий посвящено достаточно большое количество работ, например, [5, 6]. Отличительными чертами способа управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана и устройства для его осуществления является: способ учитывает возможность случайной просадки грунта под опорами, результатом установления предаварийной ситуации является активное управление устойчивостью, которое не исключает движения в сторону аварийной опоры в случае достижения критического момента, когда будет выполняться условие нормального функционирования или составленные контрольные комбинации изменения скоростей давления будут соответствовать эталонным; устройство для реализации способа управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана универсально, так как в основе его действий лежит математическая модель ГПМ, находящаяся в памяти бортового микропроцессора, и может быть изменена в зависимости от типа крана и его индивидуальных особенностей и усложнена (вес стрелы, учет динамических нагрузок, изменения параметров стрелы на одном кране) при предъявлении более жестких требований и по мере развития исследований (т.е. устойчива к моральному старению).

Литература:

1. Алгоритмы нечёткой логики в управлении устойчивостью стационарного башенного крана / П.А. Сорокин, В.Ю. Анцев, А.В. Редькин, В.А. Обыдёнов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 4. С. 238-245.

2. Исследование устойчивости мобильных грузоподъемных машин методом конечных элементов / Обыденов В.А., Анцев В.Ю., Сорокин П.А., Мишин А.В. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 3. С. 30-36.

3. Патент 2267458 РФ. Система контроля грузовой устойчивости мобильных грузоподъемных машин / П.А. Сорокин, А.В. Редькин, М.В. Козлов. Опубл. 10.01.2006. Бюл. № 1.

4. Патент 2349536 РФ. Способ управления грузовой устойчивостью мобильного грузоподъемного крана и устройство для его осуществления / Сорокин П.А., Чернов А.В., Жильцов А.В. 20.03.2009. Бюл. № 8.

5. Krykun D., Ostroverkh R. Calculating stability of auto-hydraulic hoist // Инновации в технологиях и образовании. Сборник статей участников IX Международной научно-практической конференции. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева. 2016. С. 202-205.

6. Pat. US 2010/0006530. Method for controlling the slewing movement of the rotary part of a tower crane / Juraszek, Cedric. Published on 14-Jan-2010.

The method of stability control mobile crane and device for its implementation

Redkin A.V.[1,a], Orlov V.I.[1,a], Ilyin V.S.[1,a]

[1]Tula State University, 92 Prospect Lenina, Tula, 300012, Russian Federation
[a]ptm@tsu.tula.ru

Keywords: load-lifting machines, security, stability, control, monitoring

The device of the bunker is considered, allowing to carry out unloading of lumpy material, predisposed to jamming in a closed volume if the conditions of gravitational outflow are violated. Conditions of gravitational outflow of the material change during operation due to sticking to the bottom of the hopper of small wet particles, which leads to an increase in the coefficient of friction and the hanging of pieces of material with its continuous flow. Restoration of conditions of gravitational outflow is carried out by torsion of lump material with the help of an executive body and by drying the bottom of the hopper with compressed air. The executive body is made in the form of steps from the plates, which are connected together in pairs in diaphragms with slots for the nozzles. Plates are fixed from the inside of the hopper to vertical walls and are located at an angle of 60° to the horizontal. The nozzles are made in the form of a box of trapezoidal cross-section and are installed from the outside of the hopper in the wall and grooves of the diaphragms. The nozzles are fixed hinged, which allows you to adjust their angle of inclination relative to the actuator.

УДК 621.9

Проблемы резания композитов с высокопрочными наполнителями

Карасов Т.А.[a], Храмовских В.В.[b], Жихарев В.С.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]techmash@brstu.ru, [b]viktor365@mail.ru,[c]zhikharevvs85@gmail.com

Ключевые слова: композиционные материалы, режимы резания, качество поверхности, скорость резания

Представлены исследования проблем резания высокопрочных композиционных материалов на полимерной основе, в частности стеклотекстолитов. Установлено, что на качество обработанной поверхности и интенсивность износа режущего инструмента оказывают влияние режимы резания и марка применяемого инструментального материала. Существующие исследования не в полной мере отражают влияние этих характеристик на процесс резания и параметры оценки годности детали, поскольку отсутствует варьирование скорости резания, а номенклатура исследованных инструментальных материалов ограничена. Предварительные исследования, проведенные с использованием твердосплавного инструментального материала марки ВК6ОМ, показывают, что при увеличении скорости резания период стойкости режущего инструмента уменьшается в степенной зависимости. Результаты исследования влияния режимов обработки с варьированием скорости резания и применением высокопрочных инструментальных материалов позволят оптимизировать процесс обработки полимерных композитов с точки зрения производительности обработки, износостойкости режущего инструмента и качества обработанной поверхности.

Введение. В настоящее время для изготовления деталей все чаще применяются материалы, обладающие высокими прочностными свойствами, что обусловлено развитием технологий и необходимостью совершенствования узлов и механизмов различных устройств. Традиционные конструкционные материалы, такие как стали и их сплавы, цветные металлы и их сплавы, способны обеспечить требуемую прочность деталей, однако имеют высокую стоимость и значительную массу. Для устранения этих проблем в промышленности реализуются технологии изготовления деталей из композиционных материалов. Наиболее широко распространены композиционные материалы на полимерной основе, армированные стеклянными, углеродными, борными и органическими волокнами и тканями [1–4]. Эти материалы, как правило, состоят из двух или более компонентов, обладающих различными физико-химическими свойствами и объединенных в единую макроструктуру. Композиты имеют высокую прочность в сочетании с низкой плотностью, способны сопротивляться коррозии и химическому воздействию, а также обладают сравнительно невысокой стоимостью. Однако полимерные композиты имеют ряд недостатков. Как известно, для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов применяются экструзия, прессование, намотка и другие технологии, позволяющие получать необходимый профиль детали, однако во многих случаях для получения готовой детали необходимо применять механическую обработку. При этом возникают трудности, связанные со спецификой свойств полимерных композитов: деструкция полимерного связующего и появление в процессе механической обработки твердых структур, оказывающих негативное влияние на состояние режущей кромки инструмента; высокая твердость наполнителя; слоистая структура и т.п.[3]. Это вызывает интенсивный износ режущего инструмента и приводит к неудовлетворительному качеству обработанной поверхности.

Эти проблемы решаются подбором инструментальных материалов и режимов обработки, обеспечивающих высокую износостойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности. Также важен выбор оптимальной конструкции режущего инструмента для производственных условий, который может обеспечиваться путем применения программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс разработки технологического процесса [5–13].

Высокая износостойкость режущего инструмента может быть достигнута применением твердых сплавов, однако они трудно поддаются обработке при формировании режущей кромки инструмента [14–17]. Проблема решается путем использования технологий электроалмазной обработки с одновременной правкой круга и травлением детали, которые позволяют получать поверхности твердых сплавов высокого качества с максимальной производительностью [18, 19].

Среди широкой номенклатуры полимерных материалов стоит выделить композиты, армированные стеклянными тканями. Они применяются для изготовления деталей различного назначения, например, в машиностроении в качестве конструкций, работающих в условиях повышенных вибраций и знакопеременных нагрузок, сеток для армирования отрезных дисков или фильтров очистки отходящих газов от пыли и промышленных стоков, в автомобилестроении в качестве глушителей, панелей, теплоизоляционных прокладок и т.п., в судостроении в качестве теплозвукоизоляции судовых установок и оборудования, в авиационной промышленности и ракетостроении в качестве корпусных деталей самолетов и ракет, в химической промышленности в качестве химически стойких труб и емкостей для хранения агрессивных жидкостей, в металлургии в качестве фильтров для расплавов металлов при литье и т.п. [3, 4].

Теория. Исследования по разработке рациональных параметров резания стеклопластиков и стеклотекстолитов отражено в работах [20–32], в которых приведены результаты исследований качества обработанной поверхности, мощности обработки и стойкости режущего инструмента в зависимости от режимов резания. При этом варьирование скорости резания не осуществляется, а устанавливается ее максимальное значение, ограниченное возможностями технологического оборудования,что связано с особенностями протекания пла-

стических деформаций в процессе резания полимерных материалов. Поскольку полимеры обладают сравнительно высокими упругими свойствами, при недостаточно высокой скорости резания процесс обработки сопровождается значительной долей смятия материала и упругих деформаций, а возникающие упругие напряжения стремятся вернуть исходную форму детали и тем самым искажают профиль обработанной поверхности.

Помимо установления рациональных режимов резания необходимо учитывать параметры конструкции режущего инструмента и физико-механические свойства применяемых инструментальных материалов. В работах [22, 26, 32] приведены результатыстойкостных испытаний фрезерного инструмента, оснащенного различными инструментальными материалами с разной геометрией режущей части. Показано, что твердые сплавы с меньшим содержанием связки (Co) и размером зерна карбидной фазы (WC) имеют более высокий период стойкости. Однако существующие исследования не дают возможности сравнения марок твердых сплавов отечественного производства с зарубежными аналогами.

Скорость резания композитов. Несмотря на то, что рекомендации по выбору режимов обработки полимерных материалов указывают на необходимость установки высоких скоростей резания для обеспечения качества обработанной поверхности [21, 25, 28, 31], целесообразно провести исследования по фрезерованию стеклотекстолитов с варьированием скорости резания для установления ее зависимости на качество обработанной поверхности. В сочетании со стойкостными испытаниями режущего инструмента это позволит оптимизировать процесс фрезерования стеклопластиков и стеклотекстолитов для получения высокого качества обработанной поверхности, высокой износостойкости режущего инструмента и производительности обработки, что обеспечит повышение экономического эффекта при внедрении технологии в производство. При этом пределы варьирования скорости резания необходимо выявить в процессе предварительных испытаний без планирования эксперимента, где за основу взять уже имеющиеся результаты исследований с положительным эффектом качества обработанной поверхности, установив глубину резания и подачу в соответствии с рекомендациями [20 – 32].

Предварительные исследования проведены с использованием твердосплавного инструментального материала марки ВК6ОМ. При увеличении скорости резания период стойкости режущего инструмента уменьшается в степенной зависимости (рис. 1). Так, при скорости резания 19,2 м/с период стойкости инструмента составляет 2460 мин. Увеличение скорости резания до 51,5 м/с приводит к снижению периода стойкости до 50 мин.

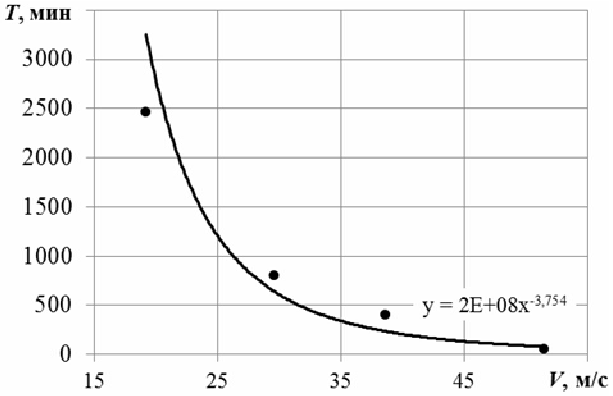


Рис. 1. Зависимость стойкости режущего инструмента от скорости резания

Для оценки работоспособности инструментальных материалов различных производителей, необходимо проведение стойкостных исследований с применением зарубежных твердых сплавов таких производителей как Sandvik, Mitsubishi и др. Это позволит оценить экономическую эффективность технологии обработки в сравнении с обработкой отечественными марками твердых сплавов. Также необходимо проведение исследований с применением минералокерамики и сверхтвердых материалов, таких как кубический нитрид бора и алмаз, что позволит оценить целесообразность их применения при резании композиционных мате-

риалов. Подобно исследованиям режимов резания, стойкостные испытания необходимо провести при фрезеровании стеклотекстолитов с варьированием подачи, глубины резания и скорости обработки для возможности оптимизации технологии обработки полимерных композитов.

Выводы. Обзор научной литературы в областипроблем резания высокопрочных композитов показывает следующие результаты:

1. Известные исследования в области обработки композиционных материалов не позволяют оптимизировать процесс фрезерования полимерных композитов из-за отсутствия варьирования скорости резания и ограниченности номенклатуры инструментальных материалов;

2. Необходимо проведение дополнительных исследований с варьированием скорости резания и применением инструментальных материалов отечественных и зарубежных производителей;

3. Для оценки целесообразности и экономической эффективности технологии фрезерования полимерных композитов необходимо проведение экспериментов с применениеминералокерамики и сверхтвердых материалов.

Литература:

1. Gorokhovsky A.V., Escalante-Garcia J.I., GashnikovaG.Yu., Nikulina L.P., Artemenko S.E. Composite materials based on wastes of flat glass processing // Waste Management. 2005. № 7. P. 733 – 736.
2. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V. Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials // International Polymer Science and Technology. 2014. № 7. P. 59 – 62.
3. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y., Park S.-J., Hui D. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites // Composites Part B: Engineering. 2015. № 73. P. 166 – 180.
4. Скрипняк Е.Г., Лобанов Д.В., Скрипняк В.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.А., Рычков Д.А. Керамические нанокомпозиты на основе диборида циркония // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 95–98.
5. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Automation tool preparation in the conditions of production, Applied Mechanics and Materials. 2015. № 770. P. 739–743.
6. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 91 – 94.
7. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Критериальная оценка конструкции режущего инструмента на примере сборной фрезы для обработки композиционных материалов // Главный механик. 2011. № 5. С. 48 – 54.
8. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // САПР и графика. 2011. № 3 (173). С. 71 –73.
9. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Петров Н.П. Методика формирования базы данных режущих инструментов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 143 – 146.
10. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. 2008. № 4. С. 214 – 216.
11. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение эффективности производства за счет автоматизации подготовки режущего инструмента // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 4 (46). С. 25 – 30.
12. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Лосев Е.Д. Режущий инструмент для обработки композиционных материалов: его систематизация и выбор рациональной конструкции // Механики XXI веку. 2012. № 11. С. 234 – 238.
13. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Кузнецов А.М. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 153 – 157.
14. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6-13.
15. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 42 – 46.
16. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Исследование качества поверхности при формировании режущей кромки фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 582 – 588.
17. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 1. С. 35 – 46.

18. Yanyushkin A.S., Saprykina N.A., Medvedeva O.I. Mechanism of protective membrane formation on the surface of metal-bonded diamond disks // Applied Mechanics and Materials. 2014. № 682. P. 327 – 331.

19. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Ivancivsky V.V. Contact processes in grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. № 788. P. 17 – 21.

20. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 26 – 29.

21. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Surface quality of the fiberglass composite material after milling, Applied mechanics and materials. 2014. № 682. P. 183–187.

22. Lemma E., Chen L., Siores E., Wang J. Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation // Composite Structures. 2002 № 1-4. P. 297 – 303.

23. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146 – 149.

24. Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.A. Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials // Doklady Chemistry. 2004. № 4-6. P. 39 – 41.

25. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // Инновационные технологии и экономика в машиностроении. 2014. С. 343 – 347.

26. Рычков Д.А. Определение периода стойкости режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // Потенциал современной науки. 2014. № 2. С. 48 – 52.

27. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Производительность непрерывной обработки резанием стеклонаполненных полимеров // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2 (26). С. 32 – 43.

28. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // Procedia Engineering. 2016. С. 942 – 947.

29. РычковД.А., ЯнюшкинА.С. Способповышенияэффективностипроизводстваизделийизполимерныхкомпозитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 3 (72). С. 23 – 30.

30. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Экономическая эффективность обработки резанием полимерных композиционных материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 172.

31. Рычков Д.А.Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 100 – 105.

32. Rychkov D.A., Yanyushkin A.S. The methodology of calculation of cutting forces when machining composite materials // Innovative Technologies in Engineering VII International Scientific Practical Conference. Conference Proceedings. National Research Tomsk Polytechnic University. 2016. P. 12088.

The problems of cutting composites with high-strength fillers

Karasov T.A. [a], Khramovskikh V.V. [b], Zhikharev V.S. [c]

Bratsk State University,40 Makarenko st., Bratsk, Russia
[a]techmash@brstu.ru, [b]viktor365@mail.ru,[c]zhikharevvs85@gmail.com

Keywords: composite materials, cutting conditions, the surface quality, cutting speed

Research of cutting problems of high-strength composite materials on a polymer basis, in particular, glass-textolites, is presented.The studies have established that the cutting conditions and the grade of the applied tool material influence the quality of the treated surface and the wear rate of the cutting tool. Existing studies do not fully reflect the influence of these characteristics on the cutting process and the parameters of the evaluation of the usefulness of the part, since there is no variation in the cutting speed, and the nomenclature of the studied tool materials is limited.Preliminary studies carried out using carbide tool material BK6OM show that when the cutting speed is increased, the period of resistance of the cutting tool decreases in power-law dependence.The results of the investigation of the effect of processing modes with the variation of the cutting speed and the use of high-strength tool materials will make it possible to optimize the processing of polymer composites in terms of processing efficiency, wear resistance of the cutting tool, and the quality of the treated surface.

УДК 621.7

Особенности схем технологических воздействий отделочно-упрочняющей обработки цилиндровых втулок судовых дизелей

Михайлов А.Н.[1,a],Костенко А.В.[2,b]

[1]Донецкий национальный технический университет, ул. Артема, 58, Донецк, 83001, Донецкая Народная Республика
[2]Камчатский государственный технический университет, ул. Ключевская 35, г. Петропавловск-Камчатский, 683003, Российская Федерация
[a]tm@fimm.donntu.org, [b] andr13kost@list.ru

Ключевые слова: функционально-ориентированная технология, судовой дизель, цилиндровая втулка, схема технологического воздействия, отделочно-упрочняющая обработка, поверхностный слой

Одной из самых нагруженных и ответственных деталей судовых дизелей является цилиндровая втулка. Составление схем технологических воздействий являются важным этапом проектирования технологического процесса изготовления цилиндровых втулок на основе функционально-ориентированного подхода, поскольку реализуют необходимые свойства детали. В статье приведен типовой технологический процесс изготовления цилиндровых втулок. Показано, что химико-термическая обработка является распространенным способом достижения нужных свойств поверхности. Показано, что функционально-ориентированный подход позволяет исправить такой недостаток химико-термической обработки как невозможность создания поверхности с изменяющимися свойствами. Приведено геометрическое отображение схем реализации технологических воздействий для поверхностей и поверхностных слоев, а также показано математическое описание схем технологических воздействий. Функционально-ориентированный подход позволяет выбрать метод или комбинацию методов отделочно-упрочняющей обработки в соответствии со схемой технологических воздействий, реализующих необходимые эксплуатационные свойства детали.

Введение. Надежность эксплуатации судов во многом зависит от надежности работы судовых дизелей, которые состоят из деталей, работающих в тяжелых условиях. Одной из самых нагруженных и ответственных деталей судовых дизелей является цилиндровая втулка. Совершенствование технологии изготовления втулки позволит решить комплексную задачу повышения надежности и работоспособности дизелей и судов в целом, уменьшая затраты на ремонт и потери, связанные с простоем судов, что актуально для рыболовного флота.

Первичным этапом жизненного цикла деталей является эксплуатация, поэтому анализ особенностей эксплуатации деталей позволяет точно изучить условия работы, нагруженность и другие важные данные для проектирования технологии изготовления или восстановления [1]. Цилиндровые втулки судовых испытывают напряжения от максимального давления газов, от бокового давления поршня, а также тепловые напряжения. Помимо этого из-за трения, возникающего между движущимися кольцами и зеркалом цилиндра, возникает абразивный износ. Из-за действия горючей смеси, отработавших газов, а также воздействия охлаждающей жидкости возникают коррозия и эрозия металла. Условия нагружения втулок предопределяют тот факт, что негативные явления или процессы зарождаются и развиваются, как правило, на поверхности втулки, поэтому при изготовлении используются различные методы отделочно-упрочняющих обработок (ОУО) с целью повышения твердости и прочности поверхностного слоя. Однако в силу особенностей работы втулки, подвергающейся сложному нагружению [2]. Необходим новый подход к проектированию и осуществлению технологического процесса получения втулки.

Цель статьи – анализ способов ОУО цилиндровых втулок, разработка схем технологических воздействия для получения необходимых свойств внутренней и наружной поверхности втулок.

Основная часть. В общем случае изготовление втулки состоит из следующих этапов [3]: черновое растачивание и обтачивание; закалка, отпуск на воздухе; предварительные растачивание и обтачивание (снятие обезуглероженного в процессе термообработки слоя); подготовка под азотирование – шлифование наружных поясков для создания установочной базы, растачивание и шлифование отверстия под азотирование; изоляция мест, не подлежащих азотированию; фосфатирование отверстия; азотирование отверстия; окончательное обтачивание (снятие вспомогательного бурта и нижней части гильзы, повышавшего жесткость гильзы в процессе азотирования); кадмирование наружной поверхности; окончательное шлифование наружных поясков и отверстия; хонингование отверстия.

Отметим, что самыми распространенными способами увеличения твердости внутренней поверхности втулок является применение химико-термических способов обработки (ХТО) – азотирование, цементация или покрытие пористым хромом.

В целом же можно выделить три группы методов ОУО [4], применение которых приводит к упрочнению поверхностного слоя:

1) изменяют физико-механические свойства слоя – поверхностное пластическое деформирование, термическая и термомеханическая обработка, лазерное и ультразвуковое упрочнение;

2) изменяют химический состав поверхности – химико-термическая обработка, лазерное и электроискровое легирование;

3) создают на поверхности слой со своими заданными составом и свойствами – наплавка, напыление и нанесение металлических и неметаллических покрытий.

Развитие прогресса приводит к появлению новых технологий, в том числе и в машиностроении. Одной из таких технологий, способных качественно повысить уровень эксплуатационных свойств деталей, являются функционально-ориентированные технологии (ФОТ), использование особых принципов которой позволяет достичь получения эксплуатационных свойств деталей полностью соответствующих требованиям современного судового машиностроения.

В соответствии со схемой создания ФОТ (рис. 1) технологические воздействия (ТВ) являются средством, при помощи которого реализуются необходимые свойства детали (С) исходя из действия эксплуатационных функций (Ф).

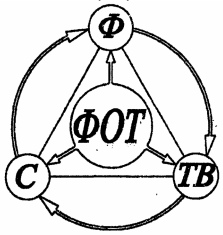


Рис. 1. Схема создания ФОТ

Таким образом, схемы технологических воздействий являются важным этапом проектирования технологического процесса изготовления цилиндровых втулок на основе функционально-ориентированного подхода, поскольку именно ТВ реализуют необходимые свойства детали, что можно представить следующим образом [5]:

$$TB \to \{M, E, I\} = \{(m_1, e_1, i_1), (m_2, e_2, i_2), ..., (m_G, e_G, i_G)\},$$

где M, E, I – потоки TB материального, энергетического, информационного типа; (m_k, e_k, i_k) - кортеж материи m, энергии e, информации i; G – мощность множества TB.

В работе [1] были изложены особенности проектирования ФОТ для изготовления цилиндровых втулок на этапе деления изделия на функциональные элементы (ФЭ). В общем случае функциональные элементы в геометрическом смысле могут быть в виде поверхност-

ных и объемных точек, поверхностной и объемной линий, поверхности и поверхностного слоя, а также объемных функциональных элементов.

Рассмотрим особенности схем ТВ для внутренней поверхности цилиндровых втулок – зеркала цилиндра. В данном случае речь идет о поверхности и поверхностном слое.

Ниже представлено геометрическое отображение схем реализации ТВ для поверхности (рис. 2) и поверхностного слоя (рис. 3).

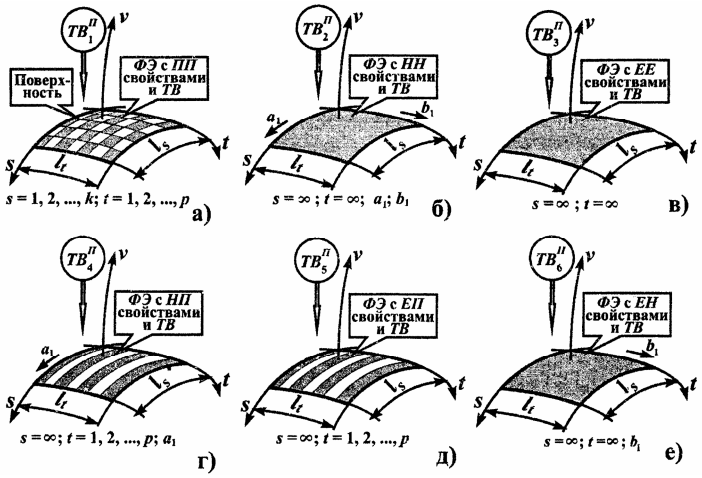


Рис. 2. Схемы реализации ТВ для поверхности:
а) создание прерывисто-прерывистых (ПП) свойств; б) создание непрерывно-непрерывных (НН) свойств; в) создание единовременно единовременных (ЕЕ) свойств; г) создание непрерывно-прерывистых (НП) свойств; д) создание единовременно-прерывистыми (ЕП) свойств; е) создание единовременно непрерывных (ЕН) свойств.

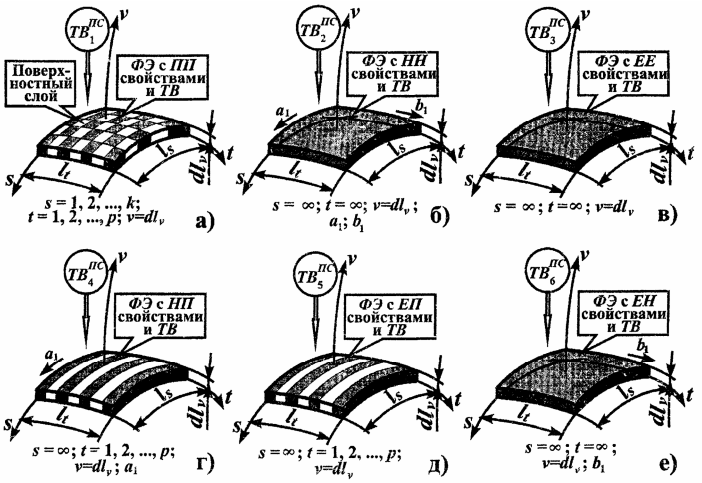


Рис. 3. Схемы реализации ТВ для поверхностного слоя:
а) создание прерывисто-прерывистых (ПП) свойств; б) создание непрерывно-непрерывных (НН) свойств; в) создание единовременно единовременных (ЕЕ) свойств; г) создание непрерывно-прерывистых (НП) свойств; д) - создание единовременно-прерывистых (ЕП) свойств; е) создание единовременно непрерывных (ЕН) свойств.

Для цилиндровых втулок имеет значение как эксплуатационные свойства поверхности (шероховатость), так и поверхностного слоя (твердость), поэтому необходимы схемы ТВ, воздействующие, как на поверхность, так и поверхностный слой. При этом в большинстве случаев, если речь вести только о зеркале, то необходимо создание непрерывно-непрерывных (НН), единовременно единовременных (ЕЕ), единовременно непрерывных (ЕН) свойств. На это указывает особенность износа и температурного нагружения – максимальные значения для верхней части и меньшие значения в нижней части втулки. Однако, для цилиндров двухтактных дизелей, имеющих окна в средней части, влияющих на кривую износа, требуются уже схемы ТВ с прерывистыми свойствами.

Приведем варианты некоторых схем ТВ орудий и средств обработки для поверхностных ФЭ и поверхностных слоев [5]:

– схема ТВ, обеспечивающая НН-свойства ФЭ в двух направлениях (непрерывная поверхность в двух направлениях *s* и *t*), см. рис. 2, б

$$TB_2^{\Pi} \to \underset{t=1}{\overset{\infty}{\wedge}} \underset{s=1}{\overset{\infty}{\wedge}} \left\{ \left(m_{s,t}, e_{s,t}, i_{s,t} \right), \left(dl_s \times dl_t \right) \right\};$$

– схема ТВ, обеспечивающая ЕН-свойства ФЭ (единовременно-непрерывная поверхность, то есть единовременная в направлении *s* и непрерывная в направлении *t*), см. рис. 2, е

$$TB_6^{\Pi} \to \left\{ \left(m_{s,t}, e_{s,t}, i_{s,t} \right), \underset{t=1}{\overset{\infty}{\wedge}} \left(\underset{s=1}{\overset{\infty}{\wedge}} dl_s \times dl_t \right) \right\};$$

– схема ТВ, обеспечивающая НП-свойства ФЭ, а именно непрерывно-прерывистый поверхностный слой, то есть непрерывный в направлении *s* и прерывистый в направлении *t* на глубине *v*)

$$TB_4^{\Pi C} \to \underset{t=1}{\overset{p}{\vee}} \underset{s=1}{\overset{\infty}{\wedge}} \left\{ \left(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v} \right), \left(dl_s \times dl_t \times dl_v \right) \right\};$$

– схема ТВ, обеспечивающая ЕН-свойства ФЭ, а именно единовременно-непрерывный поверхностный слой, то есть единовременный в направлении *s* и непрерывный в направлении *t* на глубине *v*)

$$TB_6^{\Pi C} \to \left\{ \left(m_{s,t,v}, e_{s,t,v}, i_{s,t,v} \right), \underset{t=1}{\overset{\infty}{\vee}} \left(\underset{s=1}{\overset{\infty}{\wedge}} dl_s \times dl_t \times dl_v \right) \right\}.$$

Поскольку основным способом достижения свойств внутренней стенки цилиндра являются различные способы ОУО, то задача получения заданных свойств внутренней стенки цилиндра сводится либо к выбору такого способа, который одновременно приводит к изменению свойств поверхности и слоя, либо к выбору комбинации таких способов, воздействующих по отдельности на поверхность и слой.

ХТО втулок цилиндров обладает рядом несомненных преимуществ, поскольку такие процессы изучены достаточно глубоко, существует различное оборудование и технологии, позволяющие проводить процессы на очень высоком уровне, получая при этом достаточно высокие характеристики поверхностных слоев.

Однако, общим недостатком методов ХТО заключается в том, что они не позволяют в пределах одной поверхности создать слой с изменяющимися свойствами, например, обеспечить меньший износ верхней части втулки по сравнению с нижней. Или реализовать принцип единовременного износа поверхности (ПЕИП). Т.е. при разной нагруженности верхней и нижней части внутренней стенки цилиндровой втулки обеспечить одинаковый износ. При этом, следует заметить, что для втулок двухтактных дизелей отмечается увеличение интенсивности износа в средней части втулки в районе впускных и выпускных окон, что нужно учитывать при реализации ПЕИП.

С учетом этого наиболее перспективными методами ОУО являются лазерное упрочнение, напыление поверхностного слоя, например плазменное или применение 3D-принтеров по металлу.

Наружная часть цилиндровой втулки подвергается коррозионному, температурному и кавитационному воздействию, что предполагает также необходимость прецизионных схем ТВ. Причем с учетом конструктивных особенностей наружной поверхности втулки, которая более разнообразна из-за наличия буртов, опорных поясов, окон, омываемых и неомываемых охлаждающей жидкостью поверхностей, предполагается и более широкий спектр применения ОУО. Например, химические (кадмирование, фосфатирование, цинкование и др.) для защиты от коррозии; механические методы (дробеструйная обработка) для упрочнения в зоне концентраторов напряжений (кромки, переходы, галтели); физико-термические (лазерное упрочнение) для повышения прочности поясов и др.

Выводы. Цилиндровая втулка является ответственной и нагруженной деталью судовых дизелей. Изучение условий ее работы при эксплуатации позволит получить информацию, необходимую для проектирования технологии изготовления на основе функционально-ориентированного подхода. В частности, позволит выбрать в соответствии со схемой технологических воздействий наиболее оптимальный метод ОУО или комбинацию таких методов с целью реализации на поверхности цилиндровой втулки необходимые эксплуатационные свойства, в том числе изменяющиеся.

Литература:

1. Суслов А.Г. Методология разработки новых наукоёмких технологических методов обработки рабочих поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2011. - №1. – С. 4-7.
2. Костенко А. В. Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндровых втулок на основе анализа работы судовых дизелей / А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 176-186.
3. Технология производства судовых энергетических установок / П.А. Дорошенко, А.Г. Рохлин, В.П.Булатов и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 440 с.
4. Улашкин А.П. Выбор отделочно-упрочняющих методов обработки (для повышения износостойкости деталей машин) / А.П. Улашкин. – Хабаровск: Изд-во Хабар.гос.техн.ун-та, 1998. – 103 с.
5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

Features of technological impacts schemes of finishing-hardening treatment of cylinder bushings of diesel engines

Mikhaylov A.N.[1,a], Kostenko A.V.[2,b]

[1]Donetsk National Technical University, 58 Artema st, 83001, Donetsk, 83001, Donetsk People's Republic
[2]Kamchatka State Technical University, 35 Kluchewskaya st, 683003, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation
[a]tm@mech.dgtu.donetsk.ua, [b]andr13kost@list.ru

Keywords: functional-oriented technology, ship diesel, cylinder bushing, technological treatment scheme, finishing-hardening treatment, strand shell

Cylinder bushing is one of the most loaded and responsible parts of marine diesels. Drawing up technological impact schemes is an important stage in the design of the technological process for the manufacture of cylinder bushings on the basis of a functional-oriented approach. Schemas implement the necessary properties of the detail. The article presents a typical technological process for the manufacture of cylinder bushings. It is shown that chemical-thermal treatment is a common way to achieve the desired surface properties. The disadvantage of the chemical-thermal treatment lies in the impossibility of creating a surface with changing properties. Functional-oriented approach allows correcting this disadvantage. A geometric representation of the schemes for realizing technological impacts for surfaces and surface layers is given. Also a mathematical description of the schemes of technological impacts is shown. The functionally oriented approach allows choosing a method or a combination of finishing-hardening treatment methods in accordance with the scheme of technological impacts realizing the necessary operational properties of the detail.

УДК 621-027.31

Синтез кинематических схем механизмов для привода возвратно-поступательного движения экспериментальной установки смесителя[4]

Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю.[a], Тертова А.И., Дюбанова И.Д.

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г.Новосибирск, Россия
[a]skeeba_vadim@mail.ru

Ключевые слова: группы Ассура, рычажный механизм, геометрический синтез

Многокомпонентные сыпучие смеси широко применяются в строительстве, промышленности, сельском хозяйстве. В процессе перемешивания сыпучих смесей могут образовываться «мертвые» зоны. Одним из способов ликвидации таких зон является сообщение рабочему органу смесителя дополнительного возвратно-поступательного движения. В работе рассмотрен ряд структурных групп Ассура 2-го класса 1-го, 2-го и 3-го видов, обоснован выбор четырех наиболее простых схем рычажных механизмов: кривошипно-ползунного, четырехзвенного, кулисного и эксцентриково-рычажного, представлено обоснование выбора механизма привода возвратно-поступательного движения рабочего органа экспериментальной установки смесителя. Приведены схемы и расчеты конструктивных параметров рассмотренных механизмов, позволяющих получить перемещение выходного звена в пределах заданного хода вдоль оси x. На основании проведенных исследований осуществлен выбор эксцентриково-рычажного механизма, в состав которого входят как низшие, так и высшие пары, что снижает потери на трение, упрощает изготовления, а, следовательно, уменьшает стоимость изделия.

Введение. В настоящее время выпускается большое количество многокомпонентных сыпучих смесей для их применения в различных отраслях промышленности, строительства и сельского хозяйства. Процесс смешивания зависит от конструкции смесителя и заключается в выравнивании концентраций каждого из компонентов по всему объему рабочей камеры с образованием однородной смеси.

Наибольшее распространение получили следующие способы: механические (движущимися лопастями; вращающейся рабочей камерой смесителя; пропусканием массы через сопла); пневматические и гидравлические (сжатым воздухом; паром; жидкостью); импульсные (вибрацией; ультразвуком). Наиболее простым способом перемешивания является механический [1-10].

Чаще всего механическое перемешивание осуществляется в смесителях с помощью лопастных рабочих органов, которым сообщается вращательное движение либо непосредственно от электродвигателя, либо через передаточный механизм [11-15]. При постоянной скорости их вращения могут образовываться «мертвые» зоны, т.е. некоторая часть смеси, оказывается не перемешанной, что ухудшает качество продукта. Одним из способов ликвидации такого явления может служить применение дополнительного возвратно-поступательного движения рабочих органов [16-18].

В связи с тем, что проведение экспериментальных исследований смесителя в условиях производства не представляется возможным, необходимо было создать экспериментальную установку.

[4] Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_17.

Целью данной работы является выбор механизма привода возвратно-поступательного движения рабочего органа экспериментальной установки смесителя. В связи с чем, были решены следующие задачи: произведен выбор отдельных групп Ассура, позволивший синтезировать четыре вида механизмов, для которых проведен кинематический анализ. По результатам исследований осуществлен выбор наиболее рациональной схемы механизма.

Теория. Анализ литературных источников указывает на то, что наиболее простыми и надежными являются рычажные механизмы, которые предлагаются для исследования и применения в конструкции экспериментальной установки смесителя [19-28].

Для выбора кинематической схемы был рассмотрен ряд структурных групп Ассура 2-го класса 1-го, 2-го и 3-го видов [19]. Из всего многообразия исследованных механизмов были выбраны четыре наиболее простые схемы: кривошипно-ползунный, четырехзвенный, кулисный и эксцентриково-рычажный (рис. 1–4).

Они позволяют получить перемещение выходного звена в пределах заданного хода вдоль оси *x*.

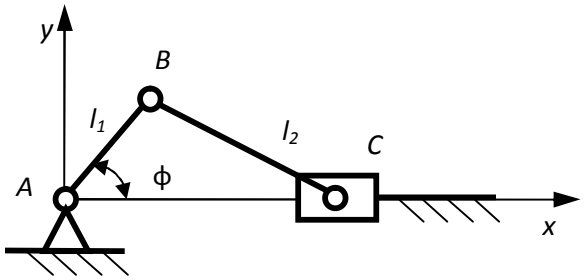


Рис. 1. Структурная схема кривошипно-ползунного механизма

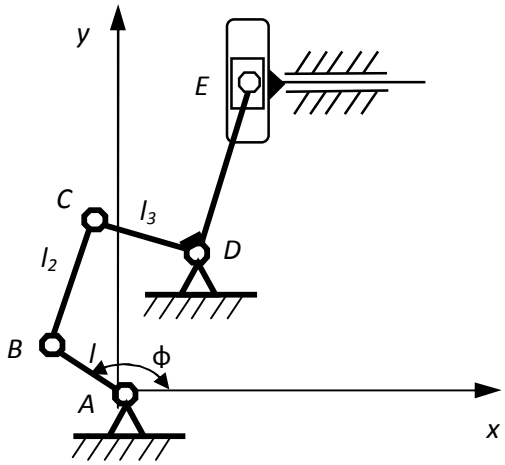


Рис. 2 Структурная схема четырехзвенного механизма

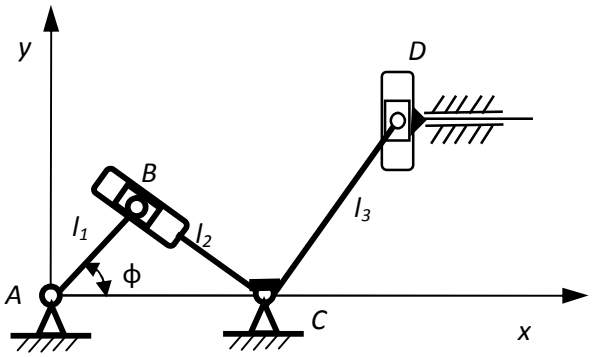


Рис. 3. Структурная схема кулисного механизма

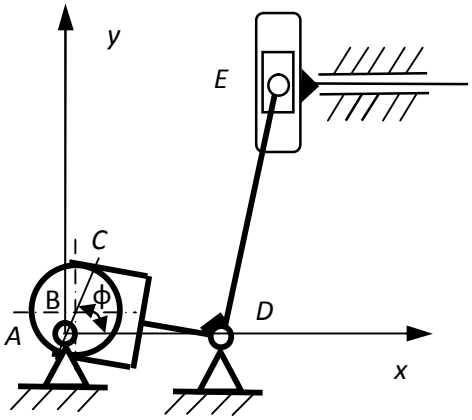


Рис. 4. Структурная схема эксцентриково-рычажный механизма

Результаты и обсуждение

Для определения конструктивных параметров выбранных механизмов проводился геометрический синтез для каждого из них.

Кривошипно-ползунный механизм (рис. 1).

На основании структурной схемы (рис. 5) и с учетом хода конечного звена (CC_1), была определена длина кривошипа, которая составила 0,030 м. Размер шатуна, равный 0,080 м, определялся, исходя из конструктивных соображений и из условия существования механизма $AB \leq BC$ [19-23].

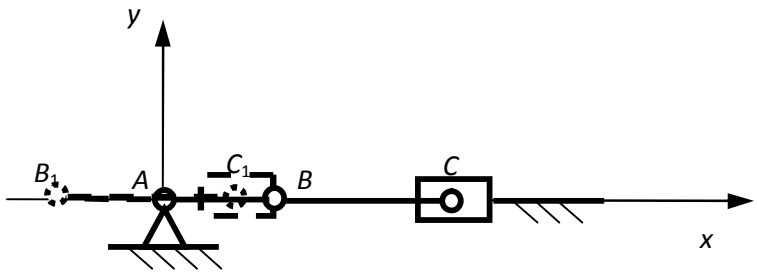


Рис. 5. Расчетная схема для кривошипно-ползунного механизма

Четырехзвенный механизм (рис. 2)

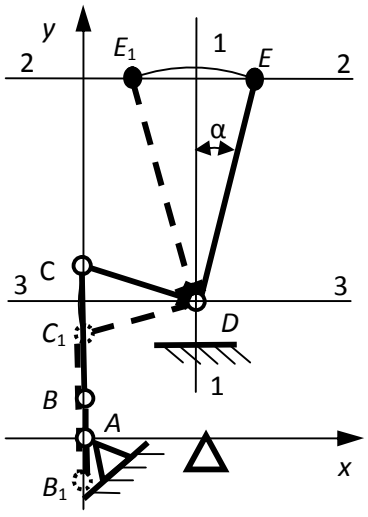


Рис. 6. Расчетная схема для четырехзвенного механизма

Синтез четырехзвенного механизма выполнялся на основании хода звена *DE* и передаточного отношения рычагов *CD*/*DE* =1/2 (рис. 6).

Из треугольника DEE_1 был определен угол α в соответствии с выражением

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{EE_1}{2DE}\right)$$

его значение составило α=0,145 рад.

На основании конструктивных соображений размер шатуна был принят 0,103 м в соответствии с условием существования четырехзвенного механизма:

$$AB<BC<CD<AD;\ AB+AD\leq BC+CD.$$

Кулисный механизм (рис. 3).

На рисунке 7 представлена расчетная схема кулисного механизма в соответствии с которой проведен его синтез с учетом перемещения ведомого звена и передаточного отношения (*BC*/*CD*).

В результате проведенного синтеза был определен угол α по выражения:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{DD_1}{2CD}\right),$$

он составил 0,145 рад.

Длина кривошипа АВ, равная 0,015 м, рассчитывалась на основании формулы:

$$AB = \frac{BC\cdot\sin(\alpha)}{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}$$

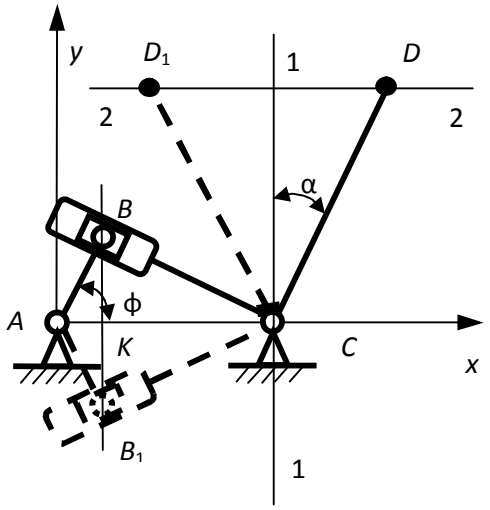


Рис. 7. Расчетная схема кулисного механизма

Из треугольника *ABC* в соответствии с выражением:

$$AC = AB\cdot\cos\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)+BC\cdot\cos(\alpha)$$

было определено расстояние между точками *A* и *C,* равное 0,105 м.

Эксцентриково-рычажный механизм (рис. 4).

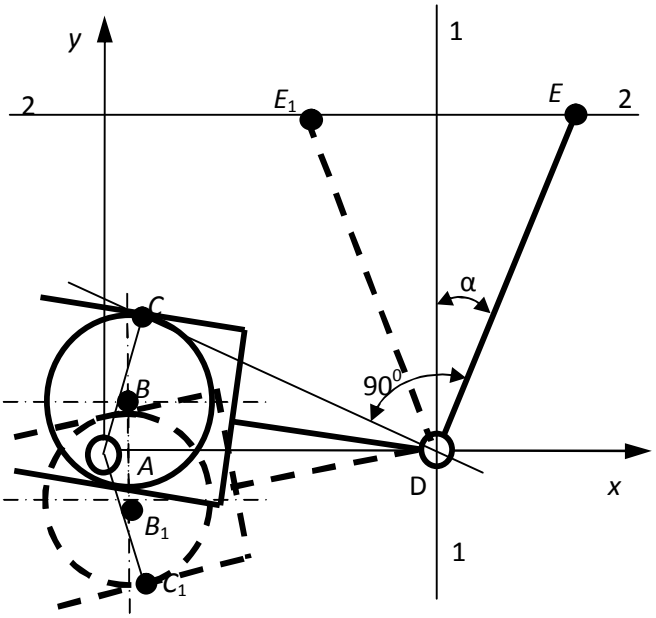


Рис. 8. Расчетная схема эксцентриково-рычажного механизма

Эксцентриково-рычажный механизм синтезирован на основании схемы, приведенной на рисунке 8 в соответствии с ходом конечного звена и передаточного отношения рычагов (*CD*/*DE*).

Угол α, равный 0,145 рад, был определен из треугольника DEE_1 по формуле:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{EE_1}{2DE}\right)$$

Расстояние *AD* и *AC* определялись из треугольника *ACD* в соответствии с выражениями:

$$AD = \frac{CD}{\cos(\alpha)}$$

$$AC = CD \cdot \sin(\alpha))$$

и составили 0,105 м и 0,015 м соответственно, а радиус $BC = AC - AB$ составил 0,00766 м.

Выводы:

1. Произведен выбор структурных групп Ассура 2-го класса 1-го, 2-го и 3-го видов, позволивший провести синтез четырех видов механизмов: кривошипно-ползунного, четырехзвенного, кулисного и эксцентриково-рычажного.

2. Проведен геометрический синтез вышеуказанных механизмов, в результате которого были определены их габаритные размеры при крайних положениях конечного звена:

- кривошипно-ползунный: по оси *x* составляют 0,110 м, а по оси *y* – 0,030 м.
- четырехзвенный: по оси *x* – 0,134 м, по оси *y* – 0,311 м.
- кулисный: по оси *x* – 0,135 м, а по оси *y* – 0,208 м.
- эксцентриково-рычажный: по оси *x* – 0,135 м, а по оси *y* – 0,208 м.

3. На основании проведенных расчетов установлено, что кривошипно-ползунный механизм неприемлем по конструктивным соображениям, а четырехзвенный механизм – из-за своих габаритов. Одинаковые габариты имеют кулисный и эксцентриковый механизмы, но в состав последнего входят как низшие, так и высшие пары, что снижает потери на трение, упрощает изготовления, а, следовательно, уменьшает стоимость изделия. С учетом вышеизложенного для привода возвратно-поступательного движения экспериментальной установки был выбран эксцентриково-рычажный механизм.

Литература:

1. Popescu A. and Olaru D. Kinematics and tribological problems of linear guidance systems in four contact points // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 147. P. 012029.

2. Skeeba V.Yu. Actual Problems and Decisions in Machine Building. Pfaffikon: Trans Tech Publ. 2015. 344 p.

3. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2014. № 11 (66). С. 83.

4. Balancing a high-speed rotor on a balancing machine / Yu.M. Grekov, I.I. Radchik, E.S. Trunin, O.V. Bol'shakov // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49, iss. 1. P. 57-60. - doi: 10.1007/s10749-015-0574-6

5. Proceedings of the 9th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics / ed. by P. Pennacchi. Cham: Springer International Publ., 2015. 2294 p.

6. Определение жесткостных характеристик и энергии деформации несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Т.Г. Мартынова, Д.В. Лобанов, И.С. Филатов, П.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 24-33.

7. Khulief Y.A., Mohiuddin M.A., El-Gebeily M. A new method for field-balancing of high-speed flexible rotors without trial weights // International Journal of Rotating Machinery. 2014. Vol. 2014, art. 603241. 11 p. - doi: 10.1155/2014/603241

8. Моделирование несущих систем технологических машин / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д.Ю. Корнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. №2 (63). С.91-99.

9. Определение основных параметров технологического оборудования / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, Д.Ю. Корнев, Е.К. Зайцев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. № 3 (60). С. 68-73.

10. Выбор конструктивных параметров несущих систем машин с учетом технологической нагрузки / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, А.В. Кириллов, О.В. Максимчук, Д.В. Лобанов, В.Р. Глейм, А.К. Жигулев, О.В. Саха // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 4 (69). С. 51-60.

11. Методика уравновешивания роторов технологических машин / Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю., Лобанов Д.В., Жирова А.А., Бредихина А.Н., Косилов А.С., Печоркина Н.С. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 2 (71). С. 41-50.

12. Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Войнова Е.В. Уравновешивание рабочего вала смесителя непрерывного действия // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции. 2010. С. 127-129.

13. Мартынова Т.Г., Подгорный Ю.И. Исследование уравновешенности рабочего вала мешалки непрерывного действия // Сборник научных трудов НГТУ. 2008. № 2 (52). С. 41-46.

14. Подгорный Ю.И. Уравновешивание роторов технологических машин / Ю.И. Подгорный, Т.Г. Мартынова, А.Н. Бредихина, А.С. Косилов, Н.С. Печоркина // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 256-262.

15. Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г. Влияние точности изготовления месильных лопаток на уравновешенность рабочего вала смесителя непрерывного действия // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2010. № 3. С. 119-126.

16. Влияние точности изготовления элементов ротора на его уравновешенность / Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, Т.Г. Мартынова, А.С. Косилов // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2 (48). С. 119-123.

17. Исследование неустановившегося движения двухвального смесителя непрерывного действия / Т.Г. Мартынова, Ю.И. Подгорный, В.Ю. Скиба, И.С. Захарченко, П.Ю. Скиба // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9-2 (51). С. 61-65.

18. Подгорный Ю.И., Птицын С.В., Мартынова Т.Г. Исследование состояния автоматической линии по выработке макаронных изделий BRAIBANTI на ОАО "Новосибирская макаронная фабрика" // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 15-18.

19. Артоболевский И. И. Механизмы в современной технике : Справоч. пособие : В 7 т. Т. 5. Кулачковые и фрикционные механизмы. Механизмы с гибкими звеньями. 2-е изд., перераб. М. : Наука. 1981. 400 с.

20. Артоболевский И.И., Левитский Н.И., Черкудинов С.А. Синтез плоских механизмов. 1959. 1084 с.

21. Колчин Н.И., Мовнин М.С. Теория механизмов и машин: Учебник для вузов. Л. : Судпромгиз, 1962. 616 с.

22. Левитский Н.И. Теория механизмов и машин: Учеб. пособие для ун-тов и втузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1990. 590 с.

23. Фролов, К. В. Теория механизмов и машин. М.: Высшая школа, 1987. 496 с.

24. Fomin A., Paramonov M. Synthesis of the Four-Bar Double-Constraint Mechanisms by the Application of the Grubler's Method // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P.871-877.

25. Fomin A., Dvornikov L., Paramonov M., Jahr A. To the theory of mechanisms subfamilies // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 124. P. 012055.

26. Varbanov H., Yankova T., Kulev K., Lilov S. S&A - Expert system for planar mechanisms design // Expert Systems with Applications. 2006. Vol. 31(3). P. 558-569.

27. Chedmail P., Cognet G., Fortin C., Mascle C., Pegna J. Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. Springer Netherlands Publ., 2002. 488 p.

28. Tichkiewitch S., Tollenaere M., Ray P. Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II. Springer Netherlands Publ., 2007. 546 p.

The synthesis of mechanism kinematic schemes for the reciprocating movement transmission of the experimental plant mixer

Podgornyj Yu.I., Martynova T.G., Skeeba V.Yu.[a], Tertova A.I., Dyubanova I.D.

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]skeeba_vadim@mail.ru

Keywords: Assur groups, lever mechanism, geometric synthesis

Multicomponent loose mixtures are widely used in construction, industry and agriculture. "Dead" zones may be formed during the loose mixture kneading. One way of eliminating such zones is to impart the additional reciprocating movement to the mixer work member. A number of Assur structural groups of the 2nd class II of the types I, II and III were considered, and the four simplest schemes of lever mechanisms were chosen, namely slider-crank, four-link, coulisse and eccentric lever mechanisms; the rationale for selecting a mechanism for the reciprocating movement of the experimental mixer work member transmission is presented. Diagrams and calculations of the considered mechanisms design parameters are provided allowing for the movement of the output link within the specified progress along the x-axis. On the basis of the studies carried out, the selection of an eccentric lever mechanism is validated since it comprises both the lower and the higher pairs, which reduces friction losses, simplifies production, and therefore cuts down the cost of the product.

Funding: This study was supported by a NSTU grant (project No. ТП-ПТМ-1_17)

УДК 620. 22

Исследование структуры и свойств вихревых зон многослойного материала «молибден-медь» полученного сваркой взрывом

Кучумова И.Д.

Новосибирский государственный технический университет, проспект К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия
ivannakz@mail.ru

Ключевые слова: структура, микротвердость, композиционный материал, механическая смесь

Соединение между собой разнородных материалов является одной из актуальных, но в то же время весьма сложных задач в машиностроении. Как правило, сварка разнородных материалов не возможна с применением классических или современных методов сварки, поэтому для получения соединения из разнородных материалов в таких случаях применяют метод сварки за счет высокоскоростного соударения двух заготовок. В работе представлены результаты исследования структуры и микротвёрдости соединения пластин меди и молибдена, полученные методом сварки взрывом. Показано, что граница между свариваемыми материалами имеет волнообразный характер. В отдельных участках границы образуются зоны перемешивания двух материалов. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что зоны перемешивания склонны к формированию структуры механической смеси.

Введение. Сварка взрывом является одним из методов получения соединения между разнородными металлами. Как правило, в процессе сварки взрывом метаемая пластина, разгоняемая за счёт энергии взрыва, соударяется под углом с неподвижной пластиной [1]. Высокие давления, возникающие в процессе соударения, обеспечивают плотный контакт между

свариваемыми материалами. Как правило, прочность получаемого соединения соответствует свойствам наименее прочного из соединяемых материалов [1-3].

Наиболее характерным для сварки взрывом явлением является формирование волнообразной поверхности раздела между свариваемыми заготовками. В зонах контакта свариваемых пластин иногда образуются так называемые вихревые участки, в которых происходит локальное расплавление, смешивание и кристаллизация материала соединяемых пластин. Явление образования вихревых зон, типичного для сварки взрывом, изучено недостаточно хорошо.

Информация о структуре вихревых зон, формирующихся при сварке взрывом меди и молибдена, отсутствует. Поэтому целью данной работы является исследование структуры вихревых зон полученных при сварке взрывом пластин меди и молибдена.

Материалы и методы исследования. В качестве свариваемых материалов были использованы медные пластины толщиной 0,3 мм и молибденовые пластины толщиной 0,5 мм. Соединение пластин производилось в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, в сферической взрывной камере №20 расположенной в блоке 4.

Полученный композиционный материал исследовался методами оптической микроскопии (микроскоп *Carl Zeiss Axio Observer A1m*), просвечивающей электронной микроскопии *(Tecnai G2 20 TWIN*). Образцы для оптической микроскопии представляли собой поперечные шлифы, приготовленные по стандартной технологии, включающей шлифование и полирование на алмазных суспензиях. Элементный состав свариваемых пластин определялся при помощи метода энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа (*Oxford Instruments X-Axt*). Для оценки механических свойств полученного материала использовался метод измерения микротвёрдости по Виккерсу (*Wolpert Group 402MVD*).

Результаты исследования. На рисунке 1 представлено изображение композиционного материала, полученное методом оптической микроскопии. На полученных фотографиях видно, что при сварке взрывом в сварном шве образовались асимметричные волны с зоной смешивания материала.

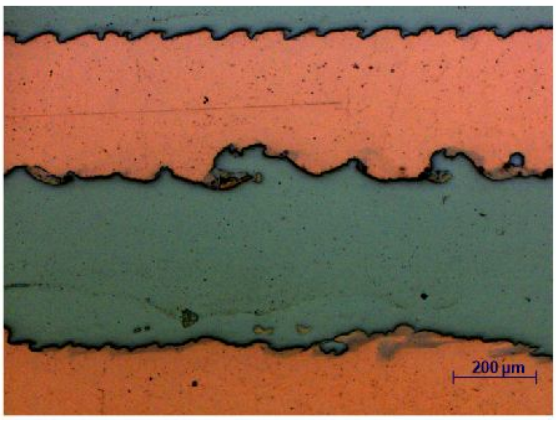


Рис. 1. Волнообразная поверхность раздела между свареннными пластинами меди и молибдена

На фотографиях с растрового электронного микроскопа зоны смешивания видны более ярко. Виден вихревой процесс, который происходил в материале в момент движения точки контакта соударяемых пластин.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1

Элементный состав свариваемых пластин

Материал пластин	Cu (вес. %)	Mo (вес. %)
Cu	100	-
Mo	-	100

На рисунке 2 представлены результаты измерения микротвердости по Виккерсу. На графике видно, что твердость материала вихревой зоны отличается от твердости свариваe-

мых материалов. Это связано с тем, что при сварке взрывом разнородных материалов структура вихревой зоны зависит от сочетания свариваемых материалов. Стоит отметить, что нерастворимые друг в друге металлы образуют на границе механические смеси.

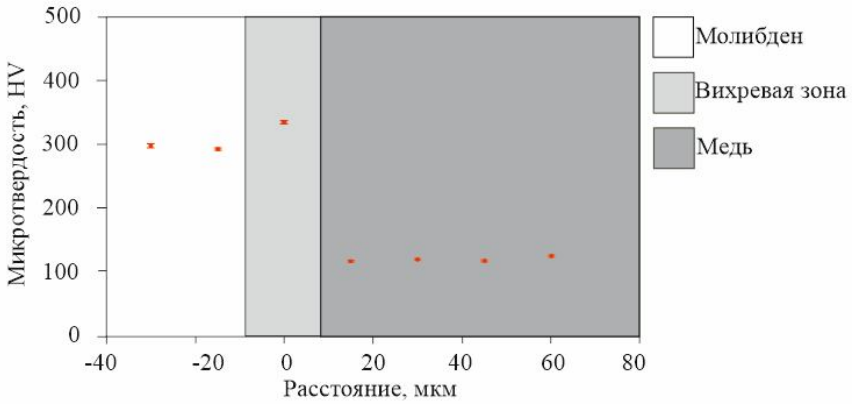


Рис. 2. Распределение микротвёрдости по сечению образца вблизи границы между медью и молибденом

Изображения структуры вихревой зоны, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии, показали, что в результате сварки взрывом молибдена и меди вихревая зона имеет структуру механической смеси зерен меди и молибдена с высокой степенью измельчения зерна (рисунок 3).

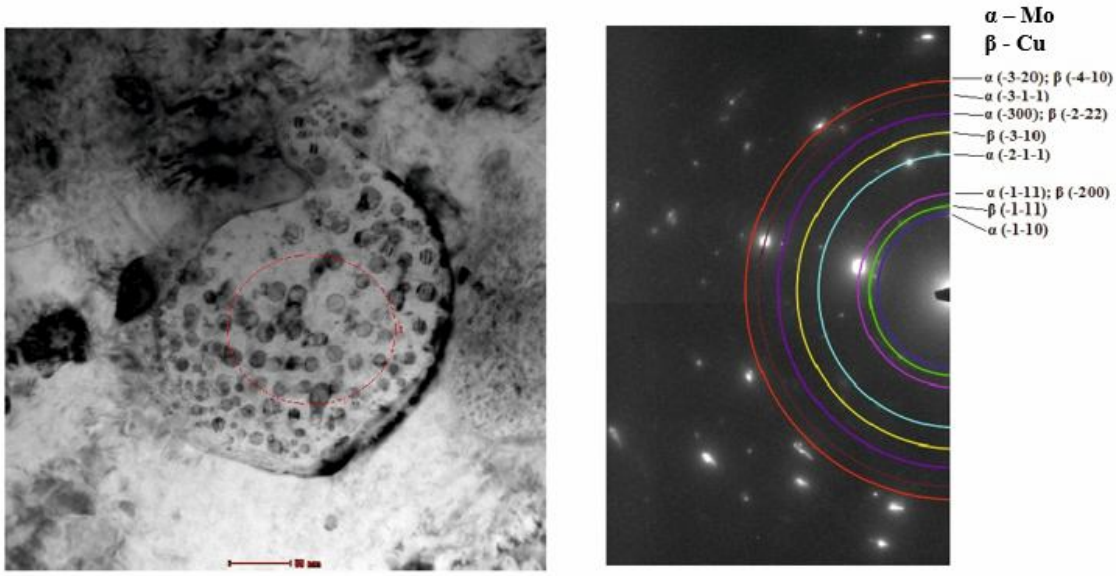


Рис. 3. Структура вихревой зоны композиционного материала «медь-молибден»

Вывод. Анализ структуры и свойств сварного шва композиционного материала «медь-молибден» показал, что структура вихревой зоны представляет собой механическую смесь зерен молибдена и меди с высокой степенью измельчения зерна. Вследствие высокой степени деформации в околошовной зоне медь имеет двойниковую структуру.

Литература:

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 2005. 544 с.
2. Findik F. Recent developments in explosive welding // Materials & Design, March 2011. Vol. 32. P.081–1093
3. Patterson Alan R. Fundamentals of Explosion Welding // ASM Handbook Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering, 1993. Vol. 6. P. 160-164.

The research of the structure of plates of copper and of molybdenum are connected by explosion welding

Kuchumova I.D.

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
ivannakz@mail.ru

Keywords: structure, copper plates, molybdenum plates, explosion welding, mixing zones

The connection of dissimilar materials is one of the most urgent, but at the same time highly complex job in mechanical engineering. As a rule, welding of dissimilar materials is not possible with tried-and-tested (gas-flame, arc welding and etc.) or modern welding techniques (laser welding, plasma welding, and etc.) and so, for obtaining a compound of dissimilar materials, in such cases one applies welding technique by high-speed mutual collision of two blanks (the explosion welding). The article presents the results of the research of the structure and microhardness of the copper plates and molybdenum plates combination produced by explosion welding. It is shown that the boundary between the welded materials has an undulatory character. The mixing zones are formed in some parts of the boundary of the two materials. The mixing zones have mechanical mix structure. This structure was determined by means of transmission electron microscopy.

УДК 621.924

Повышение эффективности отделочно-упрочняющей обработки деталей на основе роторно-винтовых технологических систем

Лебедев В.А.[1a], Серга Г.В.[2], Демин Г.В.[1], Ломовцев А.А.[1]

[1]Донской государственный технический университет, пл. Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, Россия
[2]Кубанский государственный аграрный университет, ул. Калинина 13 г, Краснодар, Россия
[a]va.lebidev@yandex.ru

Ключевые слова: роторно-винтовая технологическая система, отделочно-упрочняющая, обработка, винтовой ротор, виброактиватор

В статье предложены технические решения повышения эффективности отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на основе применения роторно-винтовых технологических систем. Раскрыта сущность, конструктивные особенности и технологические возможности роторно-винтовой технологической системы с вращающимся контейнером, которая позволяет расширить диапазон изменений результирующих векторов перемещений, гранул абразивной среды и обрабатываемых деталей. Предложены пути интенсификации процесса обработки на их основе путем виброволновой активации процесса, обеспечивающей комбинированное воздействие на массу загрузки низкочастотных колебаний большой амплитуды и низкочастотных колебаний малой амплитуды. Приведены результаты экспериментальных исследований движения сыпучих материалов в винтовом контейнере, которые показали, что оптимальным значением коэффициента заполнения контейнера можно считать Kv=0,5…0,6. Дана оценка эффективности, применения винтовых контейнеров исходя из их конструктивных особенностей.

Введение. В настоящее время для выполнения отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на предприятиях машиностроительного комплекса широко применяют устройства с виброактиватором [1]. Опыт практического применения вибростанков показывает, что они эффективно работают тогда, когда рабочая камера вибростанка колеблется с

амплитудой 0,5…8 мм. Превышение указанных амплитудно-частотных характеристик приводит к значительному снижению сроков их эксплуатации. Кроме того при использовании вибростанков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей серьёзной проблемой, требующей своего разрешения, являются вопросы, связанные с загрузкой, выгрузкой деталей из рабочей зоны и их последующей транспортировкой. С целью исключения этого противоречия, а также расширения диапазона амплитудно-частотных характеристик технологического оборудования предлагается использовать для выполнения отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей технологические системы с рабочими органами в виде винтовых контейнеров [2, 3, 4].

Роторно-винтовая технологическая система с вращающимся контейнером

Предлагаемая конструкция роторно-винтовой технологической системы для отделочно-зачистной или упрочняющей обработки деталей (рисунок 1) состоит из: станины 1, выполненной в виде сварной рамы, на станине закреплен привод главного движения, состоящий из электродвигателя 2, редуктора 3 и четырех роликовых опор с ребордами 4.

Винтовой контейнер 5, снабженный двумя ободами 6, опирается на роликовые опоры. На станине смонтированы средства для загрузки 7 и разгрузки 8, а также бункер 9 для отходов. Над бункером в контейнере выполнены отверстия 10 для удаления отходов (облой, металл заусенцев, окалины и т.п.).

Роторно-винтовой станок с вращающимся контейнером работает следующим образом. Во вращающийся контейнер 5 станка, через средство для загрузки 7, беспрерывно загружается рабочая среда и подлежащие обработке детали. При вращении контейнера, рабочая среда и обрабатываемые детали совершают движение по винтовым канавкам и выгружаются из него в средство 8. Отходы обработки (облой, материал заусенцев, окалина и т.п.) через отверстия 10 выводятся в бункер отходов 9.

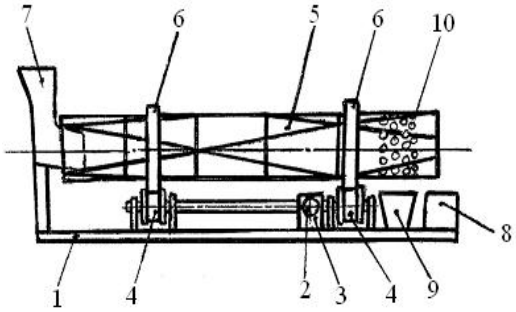


Рис. 1. Роторно-винтовой станок

Таким образом, при вращении контейнера 5 гранулы абразивных сред и обрабатываемые детали захватываются внутренней винтовой поверхностью, и в направлении вращения поднимаются и перемещаются в сторону выгрузки. По достижении определенной высоты под действием гравитационных сил и образовавшегося угла естественного откоса абразивные гранулы, и обрабатываемые детали движутся навстречу друг к другу под определенными углами и к стенкам вращающегося контейнера 5 и перемещаются в сторону выгрузки. Так как поверхность контейнера непрерывна, то и непрерывен процесс движения последующих порций обрабатываемых деталей и абразивных гранул, которые поднимаются и падают вниз, движутся под разными углами. Поскольку плоские элементы внутренней поверхности контейнера расположены под углом друг к другу, то каждая порция абразивных гранул и обрабатываемых деталей перемещается по своему вектору направления в сторону выгрузки, что в значительной степени интенсифицирует процесс взаимодействия абразивных гранул и обрабатываемых деталей друг с другом и со стенками винтового контейнера 5.

В результате такой конструкции контейнера 5, значительно расширен диапазон изменений результирующих векторов перемещений, гранул абразивной среды и обрабатываемых деталей и поэтому каждая абразивная гранула и обрабатываемая деталь движутся по разным векторам направления, что обеспечивает большую вероятность столкновений в начальный

момент отрыва их от стенок контейнера, где они обладают определенным запасом кинетической энергии и движутся с большой кинетической энергией, поэтому и обеспечивается интенсификация процесса обработки деталей.

Известно [3] что на величину скорости продольного перемещения обрабатываемых деталей и гранул абразивной среды в контейнере 5 существенно оказывает влияние изменение коэффициента заполнения K_v. Для определения оптимальной величины Kv для роторно-винтового станка проведены опыты, при изменениях углах наклона Θ винтового контейнера ($\Theta=4^0$-7^0). Эти исследования показали, что оптимальным значением коэффициента заполнения можно считать Kv=0,5-0,6.

Рабочий орган роторно-винтового станка контейнер 5 представленный на рисунке 2 изготовлен из секций 11, смонтированных из двух подсекций 12 и 13 выполненных из трех и более поочередно соединенных между собой боковыми сторонам равнобедренных трапеций 14 и равнобедренных треугольников 15.

В подсекции 12 основание 16 трапеции 14 и основание 17 треугольника 15 расположены в разные стороны подсекции, при этом секции соединены между собой большими основаниями трапеций 18, 19, как на рисунке 2, а подсекции соединены в секцию так, что основания равнобедренных треугольников, одной подсекции 12 основания 17 присоединены к верхнему основанию, 20 равнобедренных трапеций второй подсекции 13, а основания равнобедренных треугольников второй подсекции, подсекции 13 основание 21 присоединены к верхнему основанию 22 равнобедренных трапеций 14, первой подсекции 12. В результате такой последовательной сборки элементов стенок контейнера 5, по периметру образуются пять правых и пять левых ломаных винтовых линий с одинаковым шагом. Одна из пяти левых ломаных винтовых линий с шагом 23-24-25-26-27, и одна из пяти правых ломаных винтовых линий с шагом 28-29-25-30-31 показаны утолщенной линией.

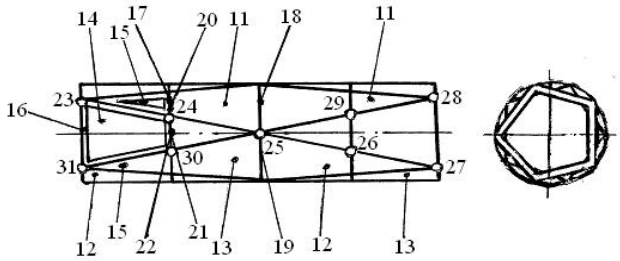


Рис. 2. Общий вид контейнера роторно-винтового станка

Интенсификация роторно-винтовой обработки деталей путем виброволновой активации процесса

С целью обеспечения эффекта виброожижения и как следствие активации массы загрузки (обрабатываемые детали и частицы рабочих сред) в роторно-винтовых технологических системах предлагается осуществить комбинированное воздействие на неё низкочастотных колебаний большой амплитуды и низкочастотных колебаний малой амплитуды.

Так как в винтовом роторе величина амплитуды движения масс загрузки определяется и ограничивается проходными диаметрами винтового ротора, то для решения такой задачи необходимо использовать винтовой ротор с большим разбросом геометрических размеров диаметров проходного сечения по длине винтового ротора, например выполненный в виде ломаного тоннеля спиральной формы с треугольным проходным сечением [3].

На рисунке 3 представлен станок для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей, в котором реализуется предлагаемая схема суммарного (одновременного) воздействия на массу загрузки колебаний больших и малых амплитуд. В представленной конструкции станка отсутствует как таковой виброактиватор, так как колебания с малой амплитудой в технологической системе создаются за счет дисбаланса самого винтового ротора и размещенной в нем массы загрузки.

Станок состоит из винтового ротора 1, загрузочного 2, разгрузочного 3 приспособлений и привода (не показан). Винтовой ротор 1 снабжен втулками 4 и 5 с возможностью вращения в подшипниковых опорах 6 и 7. Носок 8 загрузочного приспособления 2 входит в отверстие втулки 4 винтового ротора 1. Загрузочное приспособление 2, подшипниковые опоры 6 и 7, со смонтированным в них винтовым ротором 1, закреплены на раме 9. Рама 9 размещена на двух парах пневмобалонов 10, 11 которые закреплены на станине 12. Винтовой ротор 1 выполнен в виде ломаного, спиральной формы тоннеля с треугольным проходным сечением, смонтирован из секций 13. Каждая секция смонтирована из одного прямоугольника 14 и двух боковых трапеций 15 и 16, нижние основания которых равны боковой стороне прямоугольника, а верхние основания трапеций 15 и 16 равны друг другу, причем остальные свободные две стороны прямоугольника 14 равны боковым сторонам трапеций с образованием по торцам секций торцевых отверстий в виде равносторонних треугольников, наклоненных в разные стороны и к оси секций.

При сборке винтового ротора 1 каждая последующая секция повернута относительно предыдущей секции на угол соответствующий повороту на одну сторону треугольника таким образом, чтобы оси секций были наклонены друг к другу из условия их пересечения. В результате соединения секций образуется винтовой ротор 1 в виде ломаного спиральной формы тоннеля, с треугольным проходным сечением и с прерывистыми ломаными винтовыми линиями по периметру 17-18-19, 20-21-22, 23-24-25. При монтаже винтового ротора 1 и повороте секций 13 по часовой стрелке образуется винтовой ротор с правым направлением спиральной формы тоннеля, с правым направлением прерывистых винтовых ломаных линий. При монтаже винтового ротора 1 и повороте секций 13 против часовой стрелке образуется винтовой ротор с левым направлением спиральной формы тоннеля, с левым направлением прерывистых винтовых ломаных линий.

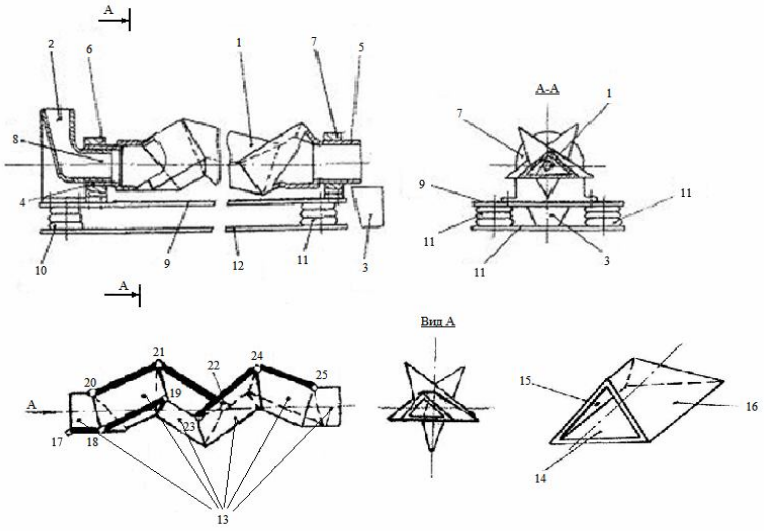


Рис. 3. Станок для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей, в котором масса загрузки подвергается суммарному (одновременному) воздействию низкочастотных колебаний больших и малых амплитуд

Станок для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки (Рисунок 3) работает следующим образом. Винтовой ротор 1 через загрузочное устройство 2 заполняется непрерывным потоком обрабатываемых деталей и рабочими средами. При вращении винтового ротора 1 обрабатываемым деталям и частицами рабочих сред сообщается сложное пространственное движение с наложением колебаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях, возбуждаемых за счет геометрии винтового ротора 1 при асимметричном движении масс загрузки и возникновения дисбаланса в результате нарушения стационарности движения потоков обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред геометрической формой секций винтового ротора, их взаимным расположением относительно друг друга и к оси вращения. При

этом центры симметрии внутренней поверхности винтового ротора 1 в каждом его элементе поперечного сечения по его длине смещены относительно оси вращения, что нарушает стационарность движения обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред. Благодаря одновременному воздействию сложно пространственного движения с большой амплитудой и высокочастотным их колебаниям малой амплитудой повышается смешиваемость обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред, их интенсивность взаимодействия между собой и со стенками винтового ротора 1. Массы потоков обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред перемещаются внутри винтового ротора от загрузки к выгрузке. При дальнейшем перемещении обрабатываемые детали и частицы рабочих сред выгружаются в разгрузочное приспособление 3.

Заключение. Технико-экономические преимущества применения роторно-винтовых технологических систем возникают за счет расширения диапазона изменений, результирующих векторов перемещения, частиц рабочих сред и обрабатываемых деталей, повышения интенсивности их смешивания и переориентации, а также увеличения скорости их перемещений от загрузки к выгрузке. Это позволяет повысить производительность отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей. За счет придания обрабатываемым деталям и частицам рабочих сред сложного пространственного движения с большой амплитудой и одновременного воздействия на них колебаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях с малой амплитудой повышается интенсивность обработки, увеличивается энергоемкость взаимодействия обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред между собой, со стенками винтового ротора 1 и обеспечивается эффективная отделочно-зачистная и упрочняющая обработка деталей в роторно-винтовых технологических систем.

Литература:

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд.2-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1986. 319с.
3. Серга Г.В., Иванов А.Н. Технология финишной обработки кромок и удаления заусенцев в винтовых роторах // Технология финишной обработки прецензионных поверхностей и удаление заусенцев. сб. тр. 6-ой междунар. науч.-техн. конф.–Санкт-Петербург, 2000. С. 249-256.
4. Серга Г.В., Кузнецова Н.Н., Иванов А.Н., Лебедев В.А. Интенсификация отделочно-упрочняющей обработки в винтовых роторах путем последовательного уплотнения и разряжения масс загрузки / межвуз. сб. науч. ст. /Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. С. 141-147.

Improving the efficiency of finishing-strengthening processing of parts based on rotary-screw technology systems

Lebedev V.A.[1a], Serga, G.V.[2], Demin G.V.[2], Lomovtsev A.A.[1]

[1]Don state technical University, Gagarin sq. 1, Rostov-on-don, Russia
[2]Kubansky state agrarian University, Kalinina, 13 g, Krasnodar, Russia
[a]va.lebidev@yandex.ru

Keywords: rotary-screw technology system, finishing-strengthening processing, the screw-rotor, vibroactivity

Abstract the paper proposed technical solutions to improve the efficiency of finishing-cleaning and hardening treatment of the parts based on the application of rotary-screw technology systems. The essence, design features and technological capabilities of rotary-screw technology system with a rotating container which allows you to extend the range of changes resulting vectors of displacements of granules of abrasive media and workpieces. The ways of intensification of the treatment process on their basis by webrevolve activation of a process for the combined effects on mass load low-frequency oscillations of large amplitude and low frequency oscillations of small amplitude. The results of experimental studies of motion of granular materials in a screw container, which showed that the optimal value of the fill factor of the container can assume KV=0,5…0,6. The estimation of efficiency of application of the screw containers based on their structural features.

УДК 621.914.5

Вариант анализа пространства формирования зубьев спироидных колёс

Пешехонов К.Ю.[a], Тарапанов А.С.[b]

Орловский государственный университет, ул. Комсомольская, 95, г. Орёл, Россия
[a]topmega2014@yandex.ru, [b]tarapanov@rambler.ru

Ключевые слова: спироидная передача, математическая модель формообразования, анализ нагрузки режущих лезвий

В статье анализируются преимущества спироидных передач за счёт преимущества их эксплуатационных параметров: возможности значительного повышения передаточных отношений, плавности и бесшумности работы, малой восприимчивости к перекосам осей червяка и колеса, возможности использования стальных заготовок взамен дорогостоящих антифрикционных материалов. Показано, что отсутствие в общедоступной литературе рекомендаций по выбору режимов резания и влияния режимов на параметры определяющие точность спироидных колёс препятствует их более широкому внедрению. В статье рассмотрено определение количества активных зубьев червячной фрезы при обработке спироидного колеса, а также представлены варианты схем резания для анализа формообразования зубьев спироидных колёс. На основе анализа сделаны выводы о нагрузке режущих лезвий зубьев червячной фрезы.

Появление спироидного зацепления существенно изменило представление о возможностях передачи крутящего момента между пересекающимися осями. В 1977 году основные параметры рабочего зацепления были стандартизованы, что в значительной степени стимулировало его целенаправленные рабочие испытания и многочисленные внедрения [1–9] (рис. 1).

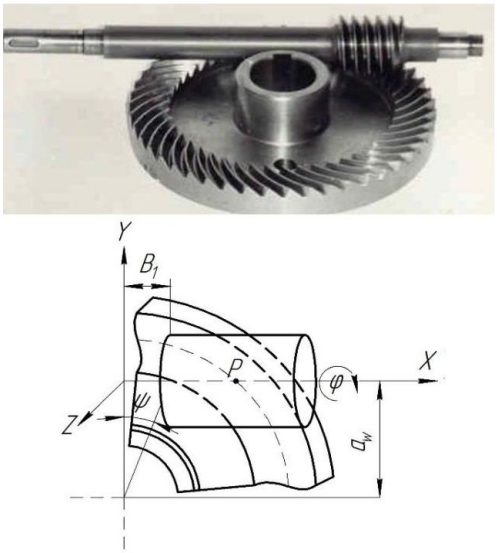
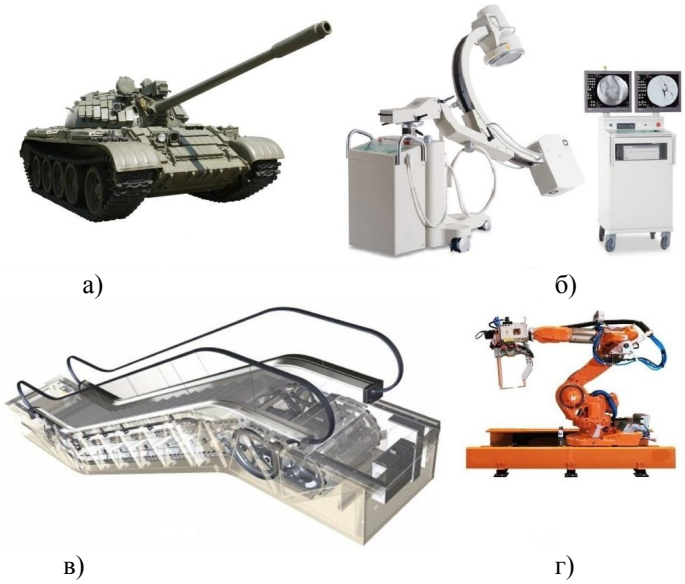


Рис. 1. Спироидная цилиндрическая передача: B_1 – удаление торца червячной фрезы от межосевой линии, a_w – межосевое расстояние, P – полюсная точка, φ – вращение червячной фрезы вокруг своей оси, ψ – делительное движение между червячной фрезой и зубчатым колесом

Выявились такие эксплуатационные преимущества спироидных передач, как возможность значительного повышения передаточных отношений, плавность и бесшумность работы, малая восприимчивость к перекосу осей червяка и колеса, возможность использования стальных заготовок вместо дорогостоящих антифрикционных материалов.

Это в достаточной мере расширило области применения спироидных передач в многочисленных механизмах подъемно-транспортных машин, роботизированных комплексах, медицинском оборудовании, в военной технике (рис. 2) и т. д.



а) б) в) г)

Рис. 2. Примеры техники и оборудования, в которых практикуется внедрение спироидной передачи: а) военная техника (подъёмный привод пушки танка); б) медицинское оборудование (высокоточное перемещение столов и других механизмов); в) подъёмно-транспортные механизмы (привод эскалатора); г) промышленный робот

Вместе с тем, технология и режимы формообразования зубьев спироидных колес остаётся за рамками общедоступных справочников и справочных пособий. Практически отсутствуют сведения о влиянии режимов обработки на параметры, определяющие точность спироидных зубчатых колёс, что не позволяет прогнозировать качество зацеплений и соответственно возможности механизмов, в которых эти зацепления применяются.

Проведенный в работе анализ пространства формирования зубьев спироидных колес является начальным этапом создания математической модели формообразования, позволяющего оптимизировать соотношение – круговой и осевой подач врезания, количественно прогнозировать значения параметров точности спироидного зубчатого венца, а следовательно, качество передачи в целом.

Произведено определение количества активных зубьев фрезы (червячной) при обработке спироидного колеса (рис. 3).

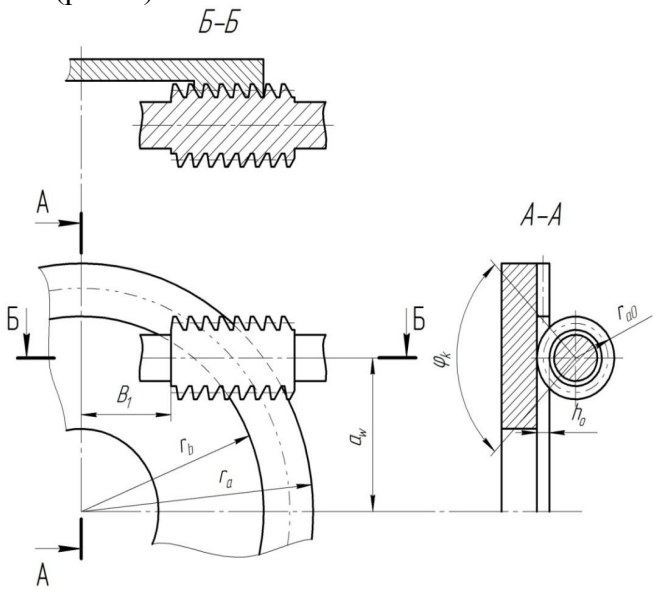


Рис. 3. Основные параметры методики определения количества активных зубьев червячной фрезы

Число активных витков фрезы:

$$n_{a0} = 0{,}318\frac{\sqrt{r_a^2 - a_w^2} - \sqrt{r_b^2 - a_w^2}}{m}, \quad (1)$$

Число активных зубьев фрезы на одном витке:

$$z_0 = 0{,}318 \cdot \arccos \frac{r_{a0} - h_0}{r_{a0}} \cdot z\,, \tag{2}$$

где z – число зубьев на одном витке фрезы.

Общее количество активных зубьев фрезы находим по формуле:

$$z_{\text{a}} = n_{a0} \cdot z_0\,, \tag{3}$$

Специфика обработки каждой впадины зубьев спироидного колеса отражается зависимостью (рис. 4) [10]:

$$\begin{aligned} X &= ((\Delta h + r_o) \cdot \cos\varphi + a_w) \cdot \sin(\psi + \Delta\psi) + \\ &+ (\pm\frac{\pi \cdot m}{4} \mp \Delta h \cdot \tan(\alpha_{1,2}) - (0{,}5 \cdot m \cdot \varphi) + B_1) \cdot \cos(\psi + \Delta\psi); \\ Y &= ((\Delta h + r_o) \cdot \cos\varphi + a_w) \cdot \cos(\psi + \Delta\psi) + \\ &+ (\pm\frac{\pi \cdot m}{4} \mp \Delta h \cdot \tan(\alpha_{1,2}) - (0{,}5 \cdot m \cdot \varphi) + B_1) \cdot \sin(\psi + \Delta\psi); \\ Z &= (\Delta h + r_o) \cdot \sin\varphi + S_o; \end{aligned} \tag{4}$$

где X, Y, Z – координаты точек режущего лезвия при формировании зубьев спироидного колеса; Δh – параметр режущей кромки; r_o – величина смещения координат центра червячной фрезы; φ – угол поворота фрезы относительно оси Z; $(0{,}5 \cdot m \cdot \varphi)$ – винтовой параметр; ψ – угол делительного движения между червячной фрезой и зубчатым колесом; $\tan(\alpha_{1,2})$ – угол наклона левой и правой кромки зуба фрезы; m – модуль зацепления; a_w – межосевое расстояние; B_1 – удаление торца червячной фрезы от межосевой осевой линии; S_o – осевая подача.

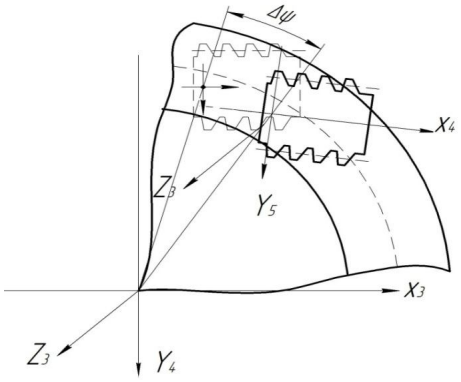
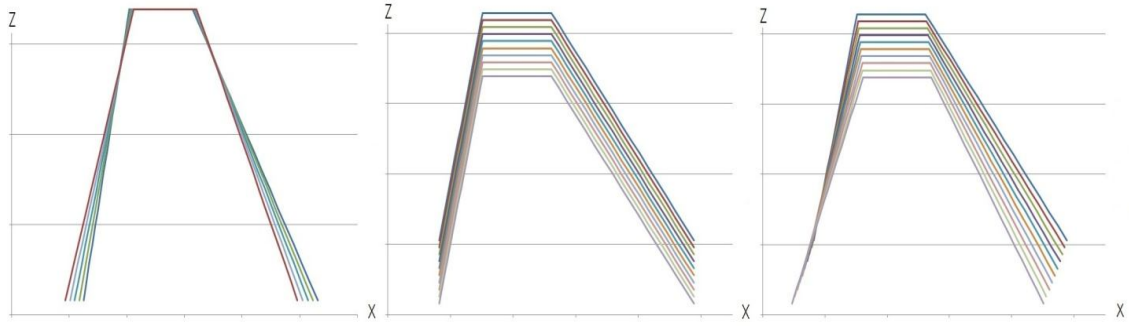


Рис. 4. Взаимное перемещение фрезы и обрабатываемого колеса



а) *б)* *в)*

Рис. 5. Исследование вариантов нагружения режущих лезвий червячной фрезы при формировании впадины спироидного колеса в плоскости XZ: а) схема резания при обкате; б) схема резания при врезании с подачей S_o; в) схема резания при совмещении обката и врезания с подачей S_o

На рис. 5 представлены варианты схем резания в плоскости XZ (рис. 4) червячной фрезой, у которой левые и правые лезвия зубьев имеют наклон в 10˚ и 30˚ соответственно. В схеме формообразования "а" представлены резы зубьев при обкате, большая нагрузка наблюдается у ножки зуба и уменьшается к вершине, а на вершинном лезвии нагрузка практически отсутствует. Вариант "б" отражает нагрузку режущих лезвий червячной фрезы при врезании. В этом случае максимально нагружено вершинное лезвие, а минимально – левое режущее лезвие. При совмещении обката и врезания (в) нагрузка правого и левого режущего лезвия существенно меняется. Главным фактором нагрузки зубьев червячной фрезы при нарезании зубьев спироидного колеса является вершинное режущее лезвие, которое воспринимает максимальную нагрузку вдоль всей кромки в течении всей обработки.

Проведенный анализ формообразования зубьев спироидных колёс позволяет сделать следующие выводы: активная суммарная длина режущих лезвий червячной фрезы с зубчатым венцом спироидного колеса больше, чем при сопоставимой обработке обычного червячного колеса; нагрузка на технологическую систему, считая её пропорциональной активной длине режущих лезвий инструмента при сопоставляемых режимах обработки больше, чем при обработке червячных зубчатых колёс; для обеспечения равномерной нагрузки технологической системы желательно сочетать окружную подачу и подачу врезания – осевую или тангенциальную.

Литература:

1. Goldfarb V.I. What we know about spiroid gearing. Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmissions. China. Vol. 1. Science Press. 2006. P. 19 – 26.
2. Анферов В.Н., Ткачук А.П., Сергеева И.В., Кузьмин А.В. Сравнительная оценка антифрикционных свойств трансмиссионных масел для спироидных передач // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 671 – 675.
3. Анферов В.Н, Гончаренко Д.А. Оптимизация зацепления спироидных передач со стальными парами // Проблемы механики современных машин. 2015. Т. 2. С. 16 – 21.
4. Верещагин М.О. Подход к проектированию спироидной цилиндрической передачи при малом передаточном отношении // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1 (23). С. 28 – 31.
5. Гольдфарб В.И. Научная школа института механики в области развития теории и практики спироидных передач // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2. (24). С. 31 – 35.
6. Гольдфарб В.И., Макаров В.В., Маслов В.М. Перспективы развития приводной техники для трубопроводной арматуры // Арматуростроение. 2005. № 5 (37). С. 43 – 45.
7. Гольдфарб В.И., Трубачев Е.С., Кузнецов А.С., Корнилов А.А. Экспериментальные исследования низкоскоростных тяжелонагруженных спироидных редукторов // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1 (23). С. 31 – 41.
8. Кузнецов А.С., Лукин Е.В., Санников А.М., Савельева Т.В. Проблемы и методы проектирования современных спироидных редукторов трубопроводной арматуры // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1 (23). С. 47 – 52.
9. Кузнецов А.С. Лукин Е.В. К вопросу оптимизационного проектирования спироидных редукторов трубопроводной арматуры // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 2 (18). С. 121 – 125.
10. Пешехонов К.Ю., Тарапанов А.С. Особенности математического моделирования процесса нарезания зубьев спироидных колес // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 6 (320). С. 77 – 81.

Variant of the analysis of the spiroid wheels teeth space shaping

Peshekhonov K.Yu.[a], Tarapanov A.S.[b]

Orel State University, 95 Komsomol'skaya st., Orel, Russia
[a]topmega2014@yandex.ru, [b]tarapanov@rambler.ru

Keywords: spiroid gear, mathematic model of shaping, analysis of the cutting blades load

In this article the efficiency of the spiroid gear is analyzed due to the advantages of their operational parameters such as possibilities of their significant increase in gear ratios, smoothness and quiet operation, low susceptibility to skewing of the worm and wheel, possibilities of using steel billets instead of more expensive antifriction materials. It is shown that the absence of recommendations in public literature sources dealing with the problem of choice of the cutting mode and the influence of the modes on the parameters defining the accuracy of the spiroid wheels prevents them from wider use. In this article the way of defining the quantity of active working teeth of the worm cutter is considered, in addition, some variants of cutting schemes for analyzing the shaping of the spiroid wheels teeth are presented. On the basis of the analysis there are the conclusions about the load of the worm cutter teeth blades.

УДК 51-72; 51-74; 621.039

Адаптивность алгоритмов моделирования кристаллических решёток

Хлыстов А.Н.

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия
alexey.khlystov@gmail.com

Ключевые слова: молекулярно-динамическое моделирование, кристаллическая решётка, частицы, атомный радиус, Blender, программный код, адаптивность

В центре работы стоят вопросы молекулярно-динамического моделирования двух поверхностей: обрабатываемой поверхности из быстрорежущей стали и поверхности алмазного шлифовального круга. Разрабатываемое для этой цели дополнение Bravais Lattices Creator, работающее в среде программного пакета трёхмерного моделирования Blender, было изначально определено для моделирования сложных молекулярных структур алмазного круга и быстрорежущей стали. До разработки этого дополнения модель быстрорежущей стали, насчитывающая полмиллиона атомов, создавалась в Blender вручную. С помощью Bravais Lattices Creator появилась возможность создавать модели молекул металлов и кристаллов нажатием одной кнопки. Библиотеку параметров можно обновлять в любой момент, добавляя новые файлы или редактировать старые. Это делает дополнение более универсальным, предназначенным для моделирования кристаллических решеток различных материалов.

Введение. Разрабатываемое дополнение Bravais Lattices Creator (BLC, дополнение, программа) [1–4], работающее в среде программного пакета трёхмерного моделирования Blender, изначально предназначено для моделирования сложных молекулярных структур алмазного круга и быстрорежущей стали. Исследование данных структур осуществляется при ювенильном контакте (шлифовании) [5–7], возникающим при комбинированной электроалмазной обработке [8–12]. Одним из несомненных достоинств данной обработки является несложная модернизация существующего заточного оборудования под электрохимические процессы [13–22].

До разработки этого дополнения модель быстрорежущей стали, насчитывающая полмиллиона атомов, создавалась в Blender вручную [22–27]. С помощью BLC появилась воз-

можность создавать модели атомов металлов и кристаллов нажатием одной кнопки. Пример интерфейса дополнения приведён на рис. 1.

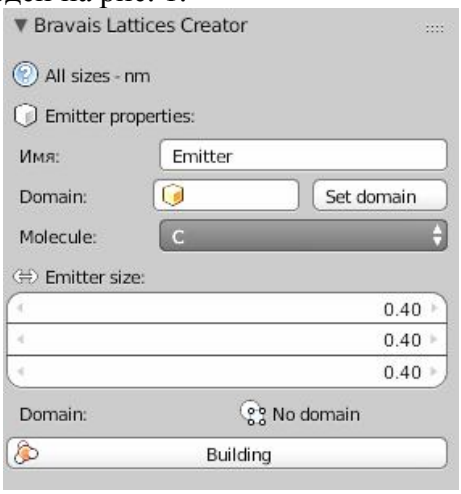


Рис. 1. Интерфейс разработанного дополнения Bravais Lattices Creator

В текущую версию дополнения заложен функционал, позволяющий создавать структуру только тех фаз, из которых состоит быстрорежущая сталь Р6М5, а также структуру алмазного зерна [28, 29]. Как параметры решеток фаз быстрорежущей стали, так и алгоритмы их построения заложены в программный код дополнения.

Отсюда очевидна негибкость дополнения BLC. Так, если потребуется изменить один из параметров моделируемой структуры, то изменять его нужно будет прямо в программном коде. Не говоря уже о моделировании какого-нибудь другого материала, отличного по химическому составу от марки Р6М5 (например, твёрдые сплавы [30–35] или современные композиционные материалы [36–39]), тогда потребуется редактировать целый комплекс программных функций, что не может быть выполнено без больших трудозатрат.

Цель проведения данной работы является повышение адаптивности дополнения BLC. Для этого требуется разработать:

- алгоритм, формирующий из заранее заданного набора параметров кристаллической решетки аргументы для программных функций;
- универсальный метод построения модели решетки;
- стандарт для описания параметров решеток.

Разработка обновленного инструмента. Негибкость BLC, обусловленная его узкой направленностью формировать решетки фаз стали Р6М5 приводит к трудностям в усовершенствовании этого дополнения. Решение этой задачи – создать адаптивный алгоритм, работающий с любыми заранее заданными параметрами кристаллических решеток.

Пользователь может выбрать в BLC любой из предоставленных типов кристаллических решеток, на данный момент дополнение содержит программный код, формирующий только несколько фаз Р6М5 и решетку алмазного зерна. Отсюда следует, что пользователь не сможет сформировать модель другой решетки, отсутствующей в программе, или отредактировать параметры уже имеющейся, поэтому есть смысл создать библиотеку параметров кристаллических решеток. Такой библиотекой может быть папка на компьютере пользователя или Интернет ресурс, содержащий файлы с параметрами, каждый такой файл мог бы соответствовать одному типу вещества. Таким образом, пользователь будет иметь возможность добавить в библиотеку свой файл или отредактировать уже имеющийся.

Стандарт для описания параметров решеток. Для правильной обработки файлов из библиотеки дополнением BLC нужно их привести к одному типу или стандартизировать (рис. 2). Предполагается, что параметры решеток удобно хранить, редактировать и программно обрабатывать в файлах с текстовым расширением, поэтому стандарт будет относиться именно к оформлению таких файлов.

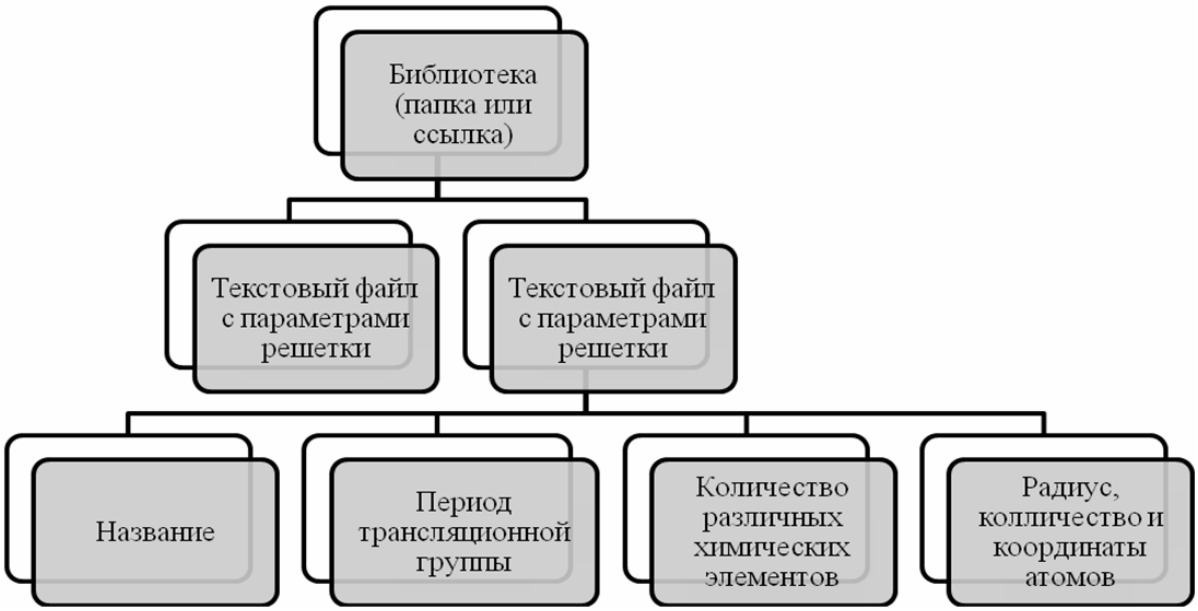


Рис. 2. Схема стандарта описания параметров кристаллических решеток в BLC

При создании нового файла (элемента библиотеки), пользователю нужно будет указать название моделируемой решетки, её период, количество различных элементов входящих в молекулу, названия для каждого элемента и их параметры, такие как радиус и координаты в рамках одной трансляционной группы.

Каждый элемент библиотеки заполняется построчно, где первая строка содержит название моделируемой решетки, вторая строка алгоритмом программы будет пропускаться, третья строка содержит значение, равное количеству различных элементов решетки, четвертая строка будет пропускаться и так далее (рис. 3). Каждая вторая строка зарезервирована для служебных пометок, поэтому они пропускаются алгоритмом обработки библиотеки. Такие строки удобно использовать для комментария к значению идущей следом строки, в комментарии можно указать пример значения и какие-либо рекомендации.

```
                    Ferrum+Chromium
# element count

                    2
# atom names

                    Fe Cr
# period (nm)

                    0.2866
# atom radiuses (nm)

                    0.252 0.254
# atom count

                    1 1
```

Рис. 3. Пример оформления параметров элемента библиотеки

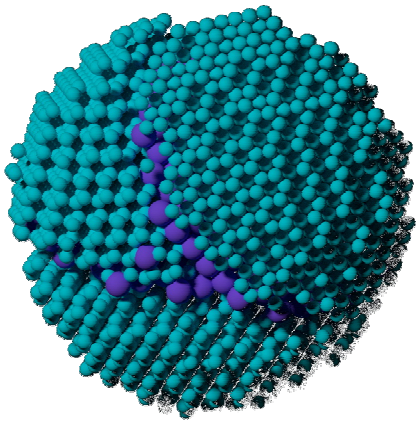


Рис. 4. Пример модели алмазного зерна

Если моделируемая решетка состоит из нескольких разных элементов, то названия и значения параметров каждого из них записываются в одну соответствующую параметру строку и разделяются пробелами, каждое такое значение распознается дополнением и обработается в соответствии с заданным алгоритмом.

Дополнение BLC будет обрабатывать файлы библиотеки, формируя коллекцию параметров, передаваемых как аргументы для программных функций. Функции в свою очередь предназначены для формирования массивов координат атомов относительно виртуальной

трёхмерной сцены. По массиву координат создается объект (источник, излучатель частиц) виртуальной сцены, состоящий из вершин, где каждая такая вершина (точка) соответствует координатам атома из массива. С помощью полученного объекта-источника встроенными в Blender средствами создается система частиц. Количество систем частиц, как и объектов-источников, будет равно значению второго параметра из библиотеки, т.е. количеству различных элементов решетки. Некоторые свойства каждой системы частиц дополнение автоматически интерпретирует с информацией об атомах (например, о радиусе) полученной из библиотеки.

Выводы:

1. Таким образом, адаптивное дополнение Bravais Lattices Creator позволит пользователю создавать модели практически любых молекулярных структур (см. пример на рис. 4).

2. Библиотеку параметров можно обновлять в любой момент, можно добавлять новые файлы или редактировать старые. Это позволит стать BLC более универсальной программой, предназначенной для моделирования решеток разных материалов, которые, как известно [40–44], могут претерпевать динамические изменения в своей структуре под воздействием различных внешних факторов [45, 46]. Также библиотеку можно будет дополнять параметрами быстрорежущих сталей с различными химическими составами, параметрами кристаллов и других сложных структур.

Литература:

1. Хлыстов А.Н. Автоматизация молекулярно-динамического моделирования // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 255–259.

2. Хлыстов А.Н. Сложность МД-моделирования физических процессов // В сборнике: Молодая мысль: наука, технологии, инновации материалы VIII (XIV) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 284–288.

3. Khlystov A.N., Kirichenko O.P. Negative aspects of molecular dynamic simulation or atomic non-quantum physics // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 205–208.

4. Бондин А.В., Хлыстов А.Н. Молекулярно-динамическое моделирование в машиностроении // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 248–251.

5. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114–120.

6. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механики XXI веку. 2010. № 9. С. 101–104.

7. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Архипов П.В., Попов В.Ю. Механизм образования защитных пленок на поверхности алмазных кругов с металлической связкой // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 1 (5). С. 132–138.

8. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. "Ключевая" популярность электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 50–57.

9. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Combined electro-diamond grinding of high speed steels // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. 2012. Т. 4. № 1. С. 91–102.

10. Попов В.Ю. Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 21–26.

11. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. 2014. Т. 1. № 18. С. 306–308.

12. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А. Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206–212.

13. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189–190.

14. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Сурьев А.А., Ереско В.С., Кузнецов А.М. Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом с его одновременной правкой: пат. 2268118. Рос. Федерация; заявл. 15.06.2004; № заявки 2004118239/02, опубл. 20.01.2006.

15. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Сурьев А.А., Ереско В.С., Кузнецов А.М. Устройство для электроабразивной обработки с одновременной правкой круга: пат. 42193. Рос. Федерация; заявл. 21.07.2004; № заявки 2004122212/22, опубл. 27.11.2004.

16. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 2210749. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116429, опубл. 20.08.2003.

17. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Янпольский В.В. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: пат. 22115641. Рос. Федерация; заявл. 13.06.01; № заявки 2001116428, опубл. 10.11.2003.

18. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Сборная фреза для деревообработки: пат. 2257289. Рос. Федерация; заявл. 30.03.2004; № заявки 2004109804/02, опубл. 27.07.2005.

19. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Сурьев А.А., Кузнецов А.М., Сталидзан М.В. Сборная фреза для деревообработки: пат. 2325272. Рос. Федерация; заявл. 04.07.2006; № заявки 2006124008/03, опубл. 27.05.2008.

20. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с перпендикулярным расположением токопроводящих вставок: пат. 144707 Рос. Федерация. № 2014105640/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. № 24.

21. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с косым расположением токопроводящих вставок: пат. 144708. Рос. Федерация. № 2014105641/02; заявл. 14.02.14; опубл. 27.08.14, Бюл. 24.

22. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Медведева О.И. Абразивный круг для электрохимического шлифования с параллельным расположением токопроводящих вставок: пат. 145108 Рос. Федерация. № 2014105639/02; заявл. 14.02.14; опубл. 10.09.14, Бюл. 25.

23. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 1. С. 137–149.

24. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187–191.

25. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 103–107.

26. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201–207.

27. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. Методика компьютерного моделирования процессов комбинированной электроалмазной обработки // Механики XXI веку. 2014. № 13. С. 91–96.

28. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах – основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 30–39.

29. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. О разрушении алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16–23.

30. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68–75.

31. Янюшкин А.С., Кузнецов А.М., Якимов С.А., Петров Н.П. Методика расчета величины разрушения режущей кромки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 8. С. 139–144.

32. Кузнецов А.М., Якимов С.А., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Расчет напряжений, возникающих при затачивании твёрдосплавного инструмента с малым углом заострения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 22. С. 25–30.

33. Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Износостойкость твердосплавного инструмента при обработке древесностружечных плит // Технология машиностроения. 2008. № 11. С. 29–31.

34. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твердосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2005. Т. 2. С. 153–156.

35. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Недостатки традиционных методов затачивания твердосплавного инструмента и пути их совершенствования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2004. Т. 2. С. 95–98.

36. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Кузнецов А.М. Новые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 153–157.

37. Кузнецов А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твёрдосплавным инструментом: дисс. канд. техн. наук 05.03.01 / Иркутский государственный технический университет. Иркутск, 2009. – 186 с.

38. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Кузнецов А.М., Мажитов С.Х. Определение рациональных режимов обработки и геометрии инструмента при фрезеровании композиционных материалов // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 203–205.

39. Кузнецов А.М., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Слепенко Е.А., Рычков Д.А. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твёрдосплавным инструментом // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 196–200.

40. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Zamashchikov Y.I. Diffusion phenomena in the combined electric diamond grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 799–800. С. 291–298.

41. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 3 (45). С. 22–29.

42. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68–74.

43. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Расчет энергии адгезии контактных поверхностей при шлифовании инструментальных материалов различными методами // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2014. № 5 (35). С. 14–19.

44. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 183–190.

45. Ivancivsky V., Parts K., Popov V. Depth distribution of temperature in steel parts during surface hardening by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 129–135.

46. Янюшкин А.С., Лосев А.Б., Якимов С.А., Попов В.Ю. Роль температуры при затачивании инструментов алмазными кругами на металлической связке // Металлургия и машиностроение: ежеквартальный специализированный информационный бюллетень. 2006. № 1. С. 49–53.

Adaptability of algorithms for modeling lattices

Khlystov A.N.

Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia.
alexey.khlystov@gmail.com

Keywords: molecular dynamics simulation, crystal lattice, particles, atomic radius, Blender, program code, adaptability

At the center of the work are questions of molecular-dynamic modeling of two surfaces: a machined surface of high-speed steel and a surface of a diamond grinding wheel. Developed for this purpose, Bravais Lattices Creator, working in the environment of Blender's 3D modeling software package, was originally designed to model the complex molecular structures of the diamond circle and high-speed steel. Before the development of this add-on, the model of high-speed steel, numbering half a million atoms, was created manually in Blender. With the help of Bravais Lattices Creator, it became possible to create models of metal and crystal molecules at the touch of a button. The parameter library can be updated at any time by adding new files or editing old ones. This makes the addition more universal, intended for modeling of crystal lattices of various materials.

УДК 65.011.56

Прототипирование при проектировании лесопогрузчиков

Колесников П.Г.[1,a], Пешков А.А.[1,b], Гордеев М.П.[1,c]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, пр.Мира, 82, г. Красноярск, Россия
[a]mfsibgtu@mail.ru, [b]peshkov140@mail.ru, [c]mp_gordeev@mail.ru

Ключевые слова: прототипирование, моделирование, 3D печать

В статье рассматриваются возможности создания трехмерных геометрических моделей для визуального понимания принципа работы оборудования для лесопогрузчиков. На стадии проектирования изделий массового потребления на машиностроительном производстве, разработчики сталкиваются с необходимостью визуальной оценки их внешнего вида, правильности конфигураций, собираемости с комплектующими деталями, оценкой возможности сбыта, более низкой стоимости и за более короткий срок. Ответы на них требуют наличия реальной модели (прототипа) изделия, максимально приближенной к своей компьютерной разработке. Виды технологий прототипирования представлены в статье. Выбран оптимальный вид технологии прототипирования при проектировании лесопогрузчиков на машиностроительном производстве. Рассмотрены особенности FDM-технологии. Представлен 3D принтер для FDM, который позволит получать прототипы. Данные наработки, дают общее необходимое представление о современных подходах к созданию новых изделий машиностроения.

Под понятием прототипирование понимают быстрый «черновой» вариант реализации базового функционала, чтобы можно было проанализировать работу системы в целом. Она может быть неэффективной, содержать ошибки или работать не полностью – всё зависит от целей прототипирования. Такой подход позволяет лучше увидеть, как устроена система. Прототипирование применяется в приборо- и машиностроении, программировании и ряде других технических областей. После этого процесса часто пересматривают архитектуру системы, реализацию функций, различные разработки и, если нет претензий, тестируют конечный продукт. Прототипирование является обязательным этапом в процессе разработки любого нового изделия. Создание качественного прототипа, максимально похожего на будущее изделие – весьма непростая задача. Приходится решать проблему точного повторения геометрической формы, собираемости, внешнего вида и поиска материалов, максимально похожих на заданные [1].

Виды технологий прототипирования:

Основным различием между технологиями прототипирования является прототипирующий материал, а также способ его нанесения [2].

- стереолитография – STL (сокращённо);
- отверждение на твёрдой основе – SGC;
- нанесение термопластов – FDM;
- распыление термопластов – BPM;
- спекание порошков лазерами – SLS;
- моделирование, с использованием склеивания – LOM;
- многосопельное моделирование –MJM.

3D принтеры и 3D сканеры используются в машиностроении для создания прототипов, технологической оснастки или конечных элементов различных систем.

Для разработки трехмерных геометрических моделей, оптимальный вид технологии прототипирования является **FDM-технология.**

FDM-технология аддитивного производства, широко используемая при создании трехмерных моделей, при прототипировании и в промышленном производстве. Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет нанесения последовательных

слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластики, поставляемые в виде катушек нитей или прутков [3].

Особенности технологии. Построение деталей на основе слоев позволяет получать детали, которые имеют сложную геометрию и при этом отличаются тщательной детализацией. Единственный недостаток данного метода в том, что во время плавки пластик распространяется в разные стороны, что не удается контролировать. Поэтому модели отличаются рельефной поверхностью, которая при обработке теряет точность. С другой стороны, только на основе данной технологии можно получить прочные с точки зрения механических и химических свойств детали.

3D-принтер для FDM. Современное оборудование, такое как 3D принтер **Hercules Strong** (рис. 1), позволит вам получать прототипы новых изделий максимально просто, нажатием одной кнопки на компьютере, а сам процесс создания прототипа, в том числе полностью функционального макета, займёт несколько часов, вне зависимости от сложности геометрии изделия.

Рис. 1. 3D принтер **Hercules Strong**

Перспектива применения 3D принтеров для машиностроения экономически очевидна, так как эти устройства существенно ускоряют процесс разработки новой продукции, в значительной степени уменьшают риски ошибки проектирования, снижают затраты на получение макета, и уже сейчас по своим ценам доступны большинству российских предприятий.

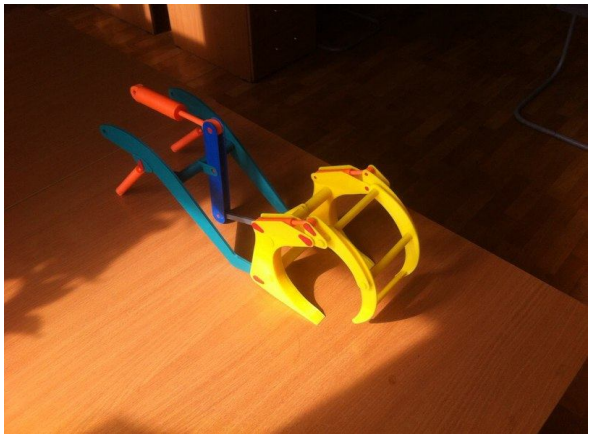


Рис. 2. Прототип технологического оборудования фронтального лесопогрузчика, созданный на основе FDM-технологии (масштаб 1:10), используемый материал термопластик

Рис. 3. Прототип «харвардер» (масштаб 1:25), используемый материал термопластик

В рамках своего дипломного проектирования, мы использовали 3D принтер **Hercules Strong** на основе **FDM-технологии.** Нами был изготовлен прототип геометрическая модель: Технологическое оборудование фронтального лесопогрузчика с поворотной платформой, на базе трактора К-708 (рис. 2) [4].

Так же в СибГАУ находится лаборатория прототипирования «СКБ Neo Mechanics».

В лаборатории мы занимаемся трехмерным моделирование и прототипированием различных машин (рис. 3) и оборудования, детали разрабатываются в трехмерной программе и отправляются на 3D печать. Печать производится на основе **FDM-технологии.**

На основе **FDM-технологии** создаются трехмерные геометрические модели, с помощью которых можно напечатать прототип, визуально оценить данную модель и протестировать.

Следовательно, этот вид технологии печати оптимальный при проектировании трехмерных моделей.

Основные преимущества:

1. Затраты на печать минимальные (материал лента из термопластика).
2. Высокая точность изготовления.
3. Высокая прочность.

Литература:

1. Косенко И.И., Кузнецова Л.В. Моделирование и виртуальное прототипирование. Учеб. пособие. – Москва: Изд-во Альфа-М Уником Сервис ИНФРА-М, 2012. – 176 с.

2. Черепашков А.А., Носов Н.В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: учеб. для студ. высш. учеб. заведений – Волгоград: Изд-ий Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.

3. Зленко М. 3D-принтеры. Что выбрать? // CAD/CAM/CAE Observer. – 2009. – № 1 (44). – С. 84–92; № 2 (46). – С. 93–96.

4. Полетайкин В.Ф. Проектирование лесопромышленного оборудования. Учеб. пособие. – Красноярск: Изд-во КГТА, 1988. – 170 с.

Prototyping in the design of loggers

Kolesnikov P.G.[1,a], Peshkov A.A.[1,b], Gordeev M.P.[1,c]

[1]Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev, Prospect Mira, 82, Krasnoyarsk, Russia
[a]mfsibgtu@mail.ru, [b]peshkov140@mail.ru, [c]mp_gordeev@mail.ru

Keywords: prototyping, modeling, 3D printing

The article discusses the possibility of creating three-dimensional geometric models for visual understanding of the principle of operation of the equipment for loggers. At the design stage of consumer products in the engineering industry, developers are faced with the need for visual evaluation of their appearance, correct configurations, the collection with accessories, evaluation of sales opportunities, a lower cost and in a shorter period of time. The answers require real model (prototype) of the product as close to its computer development. Types of prototyping technologies presented in the article. The selected optimal prototyping technology in the design of loggers in the engineering industry. Describes the features FDM technology. 3D printer FDM, which will allow to obtain prototypes. These findings, give a General necessary idea of the modern approaches to the creation of new machinery.

УДК: 621.9.047

Электроалмазное глубинное шлифование специального инструмента из ВК8

Красильников Б.А.[a], Кадырбаев Р.М.[b], Проскурин Р.С.[c], Демешко П.В.[d]

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, Россия
[a]krasilnikov@corp.nstu.ru, [b]kadyrbaev.2013@corp.nstu.ru,[c]roma_proskurin@mail.ru,
[d]petr-demeshko@mail.ru

Ключевые слова: технологический процесс, твердый сплав, электроалмазное шлифование, электрофизикохимический метод, проектирование приспособлений, модернизация станка

В данной статье разработан и представлен технологический процесс для обработки специального твердосплавного инструмента из ВК8, состоящий из трех операций. Спроектированные приспособления для обработки данного инструмента позволяют получить необходимую геометрию на модернизированных станках под электроалмазное глубинное шлифование. Подобраны необходимые технологические параметры обработки и определено время на каждой операции. Для первой операции, на которой производилась обработка паза глубиной 12 мм, шириной 8 мм и радиусом скругления 4мм, измерен износ и определен удельный расход алмазного круга и составил 2,17 мг на один грамм снятого материал. На второй и третьей операциях производится обработка скосов. Данный комбинированный метод высокопроизводителен и позволяет получить требуемое качество поверхности за один проход.

Введение. В настоящее время расширение области применения металлокерамических твердых сплавов, которыми оснащают режущие и мерительные инструменты, а также быстро изнашиваемые детали машин, позволяет в десятки раз увеличить износостойкость и скорость резания, а, следовательно, поднять производительность труда и снизить себестоимость изделий. Использование твердых сплавов сдерживают трудности их обработки. Наиболее производительным методом обработки твердого сплава является глубинное электроалмазное шлифование (ЭАШ). Данный метод является разновидностью электрофизикохимических методов обработки. Припуск при ЭАШ удаляется в результате совмещению процессов электрохимического растворения сплава, механического резания и эрозионных разрядов [1-2]. Растворение поверхности сплава происходит за счет приложенного напряжения в среде электролита, что облегчает работу алмазных зерен, которые срезают предразрушенный слой. Кроме этого, механическое воздействие на поверхность также способствует активизации процесса растворения за счет механохимического эффекта [3-4]. Эрозионные микроразряды способствуют увеличению производительности обработки за счет эрозионного съема, а также за счет сохранения высокой режущей способности, алмазного круга, т.к. эрозионные разряды удаляют с рабочей поверхности круга изношенные зерна и связку и обнажают режущие грани новых зерен.

Технология обработки. Настоящая статья посвящена разработке технологии обработки детали и проектированию приспособлений, а также определению износа фасонного алмазного круга. Чертеж обрабатываемой детали представлен на рис. 1. Стандартизованных пластин подобного типа не существует. Для получения требуемой геометрии детали разработан технологический процесс, состоящий из трех операций. В качестве заготовки выбрана твердосплавная пластина 02431 ГОСТ 25395-90.

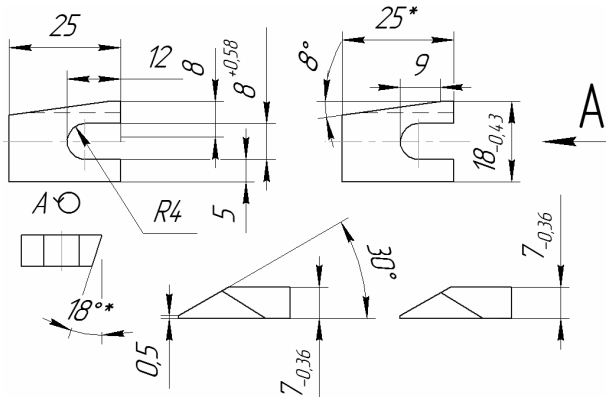


Рис. 1. Чертеж обрабатываемой детали

На первой операции производится обработка паза глубиной 12 мм, шириной 8 мм. Радиус скругления 4 мм. Деталь на данной операции обрабатывается на всю глубину на модернизированном для электроалмазного шлифования заточном станке модели 3В642. Модернизация данного станка для электроалмазной обработки заключается в разработке и изготовлении источника технологического тока (U=6…15В, I_{max}=100А), контактно-щеточного устройства для шлифовального круга, приводе медленных подач ($S_п$=10…100 мм/мин) с системой управления, системы подачи и очистки электролита.

Для обеспечения требуемой точности, а так же закрепления детали в процессе обработки разработано специальное приспособление для одновременной обработки 3-х деталей, как показано на рис. 2. Для формирования требуемой геометрии паза используется фасонный алмазный круг 1FF1 125x8x4x32-MB1-AC 80/63. В процессе обработки режущий инструмент изнашивается и ширина паза уменьшается. Размеры круга перед обработкой составляли Ø=124,85 мм и h=7,85 мм. Для обеспечения требуемой ширины и компенсации износа круга принято обрабатывать деталь за два прохода. После первого прохода производится корректировка по ширине.

Для данной операции назначаются следующие режимы: $S_п$=20 мм/мин; V=20м/с; U=8В; I=60А. В качестве электролита используется 10% водный раствор $NaNO_3$ + 1% глицерин. Время обработки 3-х деталей составляет 8 мин.

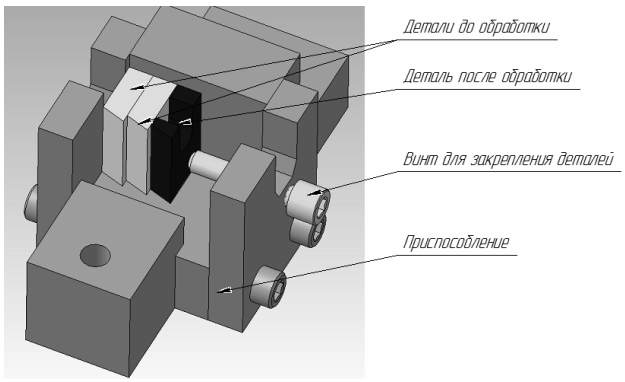


Рис. 2. Приспособление для шлифования паза

Для выполнения последующих операций была проведена модернизация станка 3Г71 для ЭАШ. Модернизация оборудования предусматривает дополнительные устройства: источник технологического тока (U=6…15В, I=500А), контактно-щеточное устройство для шлифовального круга, привод медленных подач ($S_п$=20…200 мм/мин) с системой управления, система подачи и очистки электролита. Режущий инструмент - алмазный круг 1А1 250x25x5x76-M1-AC6 125/100.

Для обеспечения требуемой точности скоса 30°, снятия припуска более 5 мм и закрепления детали в процессе работы разработано приспособление, позволяющее за один проход обрабатывать две детали одновременно (рис. 3).

На данной операции назначается следующие режимы: $S_п$=50 мм/мин; V=35 м/с; U=7-9В; I=150А. В качестве электролита используется 10% водный раствор $NaNO_3$ + 1% глицерин. Время обработки двух деталей составляет 3 мин.

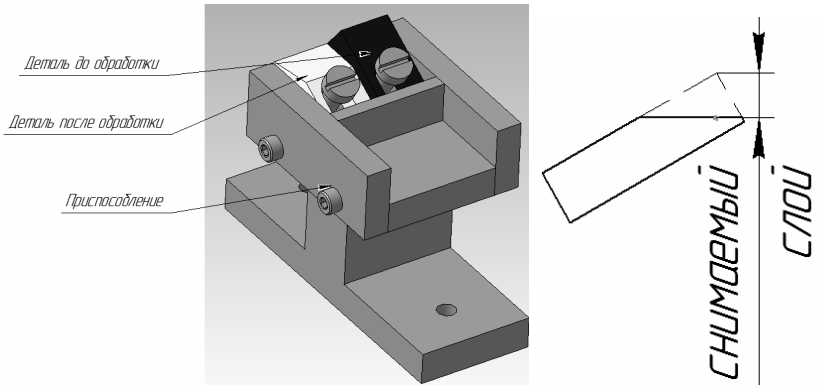


Рис. 4. Приспособление для обработки скоса 30°

На третей операции производится обработка скоса 8° с припуском более 3 мм. Обработка производится за один установ 5 деталей (рисунок 4). На данной операции используется тот же станок, что и на второй операции с теми же режимами. Продолжительность операции составляет 3 мин.

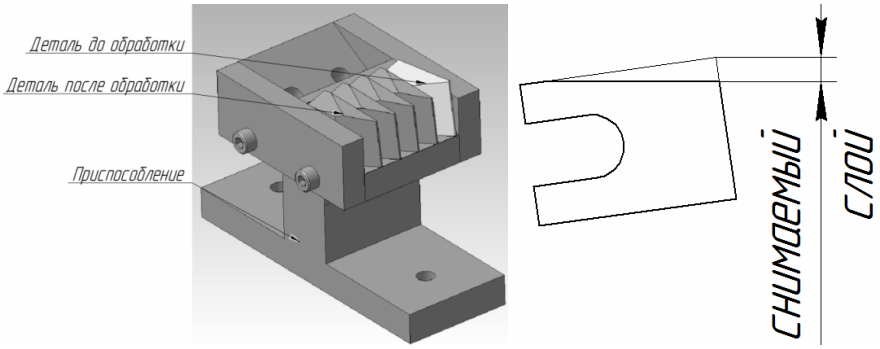


Рис. 4. Приспособление для обработки скоса 8°

Компенсация износа режущего инструмента для второй и третей операций производилась поднастройкой станка после правки круга по периферии после 50 обработанных деталей.

Результаты износа алмазного круга. Износ рабочей поверхности круга при шлифовании является сложным физико-химическим и механическим процессом, протекание которого зависит от условий обработки: характеристики круга, свойств обрабатываемого материала, режима резания и др. В настоящей работе представлены результаты исследований износа алмазного круга на первой операции (таблица 1). Износ измерялся цифровым штангенциркулем ШЦЦ-I-100 с ценой деления 0,01мм.

Таблица 1

Износ алмазных кругов при электроалмазной обработке
(Δ_1 - износ по диаметру круга, Δ_2 - износ по ширине круга)

Кол-во деталей / Параметры круга	51	105	156	215
Δ_1, мм	0,09	0,2	0,31	0,4
Δ_2, мм	0,04	0,10	0,15	0,2

На основе полученных данных представленных в таблице 1 построены графики износа алмазного круга (рис. 5).

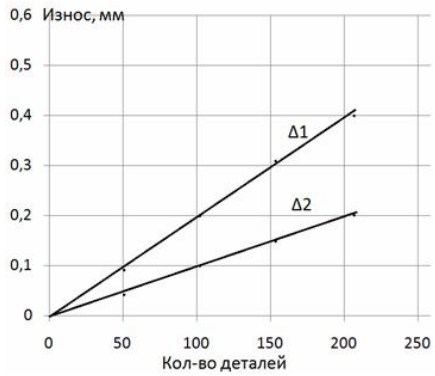


Рис. 5. Графики износа алмазного круга на первой операции

Исходя из анализа графиков, можно утверждать, что износ закономерен и предсказуем. В данной работе разработана и представлена технология и оснастка электроалмазного шлифования для обработки специального твердосплавного режущего инструмента, обеспечивающая высокую производительность обработки. Исследования износа алмазного круга на первой операции показали его высокую стойкость при обработке материала ВК8. Удельный расход алмазного круга составил 2,17 мг на один грамм снятого материал.

Литература:

1. Рахимянов Х.М., Проскурин Р.С., Герасимов Н.В. Электроалмазная обработка специального твердосплавного инструмента // В сборнике: НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ сборник научных трудов: в 9 частях. 2016. С. 323-325.

2. Рахимянов Х.М., Янпольский В.В., Моисеенко А.Н. Электроалмазное шлифование покрытий группы ВК// Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе материалы 9-й Всероссийской научно-практической конференции. 2011. С. 80-82.

3. Попов В.Ю., Филиппов В.С., Тронин Д.Ю. Электроалмазная обработка// Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 134-136.

4. Рахимянов Х.М., Красильников Б.А., Рахимянов К.Х., Никитенко М.И. Электроалмазное шлифование твердого сплава ВК8 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2010. № 3. С. 9-13.

Deep electric powered diamond grinding of a special tool from ВК8

Krasilnikov B.A.[a], Kadyrbaev R.M.[b], Proskurin R.S.[c], Demeshko P.V.[d]

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]krasilnikov@corp.nstu.ru, [b]kadyrbaev.2013@corp.nstu.ru, [c]roma_proskurin@mail.ru, [d]petr-demeshko@mail.ru

Keywords: production method, hard alloy metal, electric powered diamond grinding, electrophysical-and-chemical method, designing of devices, machine-tool retrofit

This article presents a technological process for processing a special hard alloy metal tool from ВК8, consisting of three operations. The designed devices for processing allow to obtain the necessary geometry of tool on the modernized machines for the deep electric powered diamond grinding. The necessary technological processing parameters are selected and processing time is determined for each operation. For the first operation, which processed the gutter with a depth of 12 mm, a width of 8 mm and a radius of 4 mm, the runout was measured and the application rate of the diamond tool was determined and amounted to 2.17 mg per gram of the material taken. In the second and third operations, the tapers are cutted. This combined method is high-capacity and allows to obtain the required surface quality in one passage of the tool.

УДК 621.91.01

Моделирование динамической устойчивости процесса сверления

Пятых А.С.[1,a]

[1]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83 Иркутск, Россия
[a]alexess@istu.edu

Ключевые слова: модальный анализ, сверло, сверление, гидропластовый патрон, собственная частота, коэффициент демпфирования

В статье приведены результаты исследования процесса сверления отверстий. Для проведения исследований было выбрано цельное твердосплавное сверло общего назначения. Проведен экспериментальный модальный анализ инструментальной наладки на базе гидропластового патрона с зажатым в него твердосплавным спиральным сверлом. Определены собственные частоты, поперечные и крутильно-осевые моды, коэффициенты демпфирования и модальная жесткость. Получены зависимости для расчета числа оборотов шпинделя и жесткости резания, эффективность которых доказана результатами проведенного эксперимента. Проведен расчет областей стабильного резания. На фрезерном обрабатывающем центре в алюминиевом сплаве В95пчТ2 были просверлены отверстия, измерены силы резания и проведен спектральный анализ. Результаты работы позволяют проводить моделирование процесса сверления отверстий, на основании которого назначаются режимы резания, обеспечивающие устойчивый процесс сверления.

Назначение скорости резания для операции сверления отверстий в авиационных деталях, обеспечивающей стабильный процесс резания является сложной технологической задачей. Прежде всего, это связано с большой длиной рабочей части и сравнительно малым диаметром инструмента. Неверно назначенная скорость резания приводит к возникновению вынужденных автоколебаний, что негативно сказывается на качестве получаемой поверхности. Решить данную проблему позволило бы определение скорости резания, при работе на которой не возникали бы вибрации.

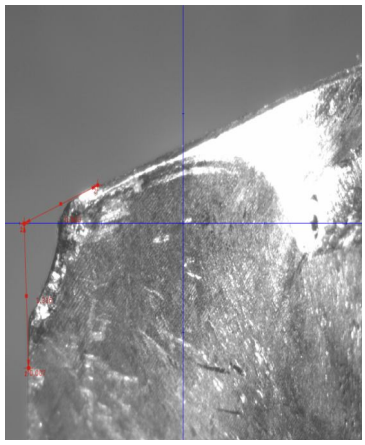


Рис. 1. Выкрашивание на периферии сверла

В мировой практике, для этого успешно применяются технологии, основанные на модальном анализе технологической системы. В результате, которого определяют модальные параметры (коэффициент демпфирования, модальная жесткость, модальная масса) для всех мод в определенном частотном диапазоне. Результатом модального анализа является передаточная функция, которая имеет пики, соответствующие собственным частотам колебаний системы. Передаточная функция может иметь множество максимальных значений, что является следствием модульности такой системы. Каждый компонент технологической вибрирует на собственной частоте колебаний, каждое значение собственных частот компонентов системы соответствует максимальному значению передаточной функции, причем, чем

меньше жесткость компонента сборки, тем больше значение магнитуды передаточной функции [1].

Однако в работах, основанных на данных предпосылках, сверление рассматривается только для увеличения диаметра предварительно просверленных (пилотных) отверстий. Данный способ является малоэффективным при работе твердосплавными сверлами. При рассверливании отверстий твердосплавными сверлами на пересечении главных режущих кромок с вспомогательными режущими кромками происходит скалывание инструмента (рис.1.), что негативно сказывается на стойкости инструмента.

Решить данную задачу позволяет построение диаграммы устойчивого резания. На основе материалов, изложенных в работах [2, 3, 4], были получены уравнения, учитывающие динамические характеристики инструментальной наладки и позволяющие построить диаграмму устойчивости для сплошного сверления. Решив общее уравнение динамики относительно возмущения, и выполнив соответствующие преобразования, была получены формулы для расчета числа оборотов шпинделя N (1) и расчета жесткости резания g (2).

$$N = \frac{\omega_n}{\frac{1}{\pi} arctg(\frac{b\omega_n}{k - m\omega_n^2})} + n, \quad (1)$$

где ω_n - частота собственных колебаний системы [Гц], k – коэффициент демпфирования [%], m – модальная масса [кг], n=1, 2, 3

$$g = -\frac{(k - m\omega_n^2)^2 + (b\omega_n)^2}{2(k - m\omega_n^2)}. \quad (2)$$

Рис. 2. Инструментальная наладка

После чего был проведен эксперимент. Для этого была собрана инструментальная наладка (рис.2). В качестве режущего инструмента было выбрано цельное твердосплавное сверло Sandvik Coromant общего назначения диаметром 9 мм, с диаметром хвостовика 10 мм. Сверло было закреплено в гидропластовый патрон CoroChuck 930-HA06-HD-20-104 [5]. Далее был проведен экспериментальный модальный анализ инструментальных наладок [3]. В случае с инструментальной наладкой на базе спирального сверла, требуется определить моды осевых, поперечных и крутильных колебаний. Поперечная и крутильно-осевая моды определяются при помощи ударного теста, модальные параметры превалирующих мод извлекают, используя стандартные методы модального анализа [4]. В то время как поперечные моды измеряют, используя обычные тесты, измерение крутильно-осевых мод требует более сложной подготовки, которая описана в [5].

Так как структурная матрица динамики сверла представлена в виде

$$[\Phi(i\omega) = \begin{bmatrix} G_{xx} & & & \\ & G_{yy} & & \\ & & G_{zz} & G_{z\theta} \\ & & G_{\theta z} & G_{\theta\theta} \end{bmatrix},$$

то требуется определить G_{xx}, G_{yy}, G_{zz}, $G_{\theta\theta}$, $G_{z\theta}$, $G_{\theta z}$. Для этого был проведен *tape – тест* инструментальной наладки и определены собственные частоты. После чего, по формулам (3), (4), (5) были рассчитаны модальная жесткость ξ, коэффициент демпфирования k и модальная масса m. Результаты расчета модальных параметров приведены в таблице.

$$\xi = \frac{\omega_{n+1} - \omega_{n-1}}{2\omega_n}, \tag{3}$$

$$k = \frac{-1}{2\xi H_{11}}, \tag{4}$$

где H_{11} – значение мнимой части передаточной функции [мкм/Н].

$$m = \frac{k}{\omega_n^2}. \tag{5}$$

Таблица

Модальные параметры инструментальной наладки на базе гидропластового патрона CoroChuck 930-HA06-HD-20-104

	Собственная частота [Гц]	Коэффициент демпфирования [%]	Модальная жесткость	Масса
G_{xx}	1152.1650	2.546	1.4220E+06 [Н/м]	0.27 [гр]
G_{yy}	1238.7103	2.268	1.3993E+07 [Н/м]	0.23 [гр]
G_{zz}	1135.5839	5.126	-2.9946E+07 [Н/м]	-0.58 [гр]
$G_{\theta z/z\theta}$	7493.1255	3.484	-2.0862E+08 [Н/рад]	-0.09 [гр.м^2]
$G_{\theta\theta}$	7169.8757	1.430	1.0711E+07 [Н/рад]	0.0053 [гр.м^2]

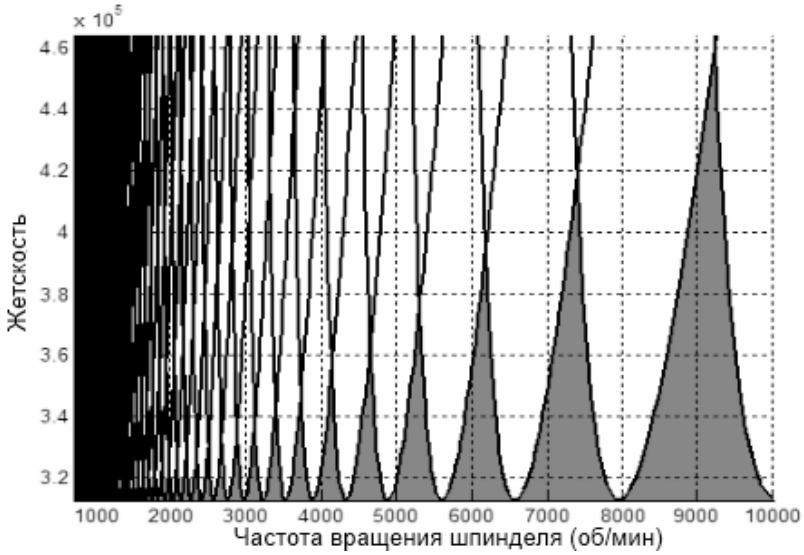


Рис. 3. Диаграмма динамической устойчивости

Модальные параметры являются характеристиками исследуемой системы шпиндель-инструментальная наладка. К ним относятся: частота собственных колебаний, коэффициенты демпфирования, модальная жесткость и масса. Коэффициент демпфирования представляет собой математическое выражение уровня демпфирования в системе относительно критического демпфирования. Модальная жесткость – отношение перемещения в точке приложения силы. Является обратной величиной податливости. Масса – масса элемента инструментальной системы с частотой собственных колебаний ω_n (ω_n – частота собственных колебаний, Гц).

На основании полученных данных в результате проведенного модального анализа инструментальной наладки (табл. 1), которые подставляются в формулы (1), (2) была построена диаграмма областей стабильного резания (рис. 3).

На диаграмме цветом обозначены области оборотов шпинделя, при работе в которых обеспечивается стабильный процесс резания.

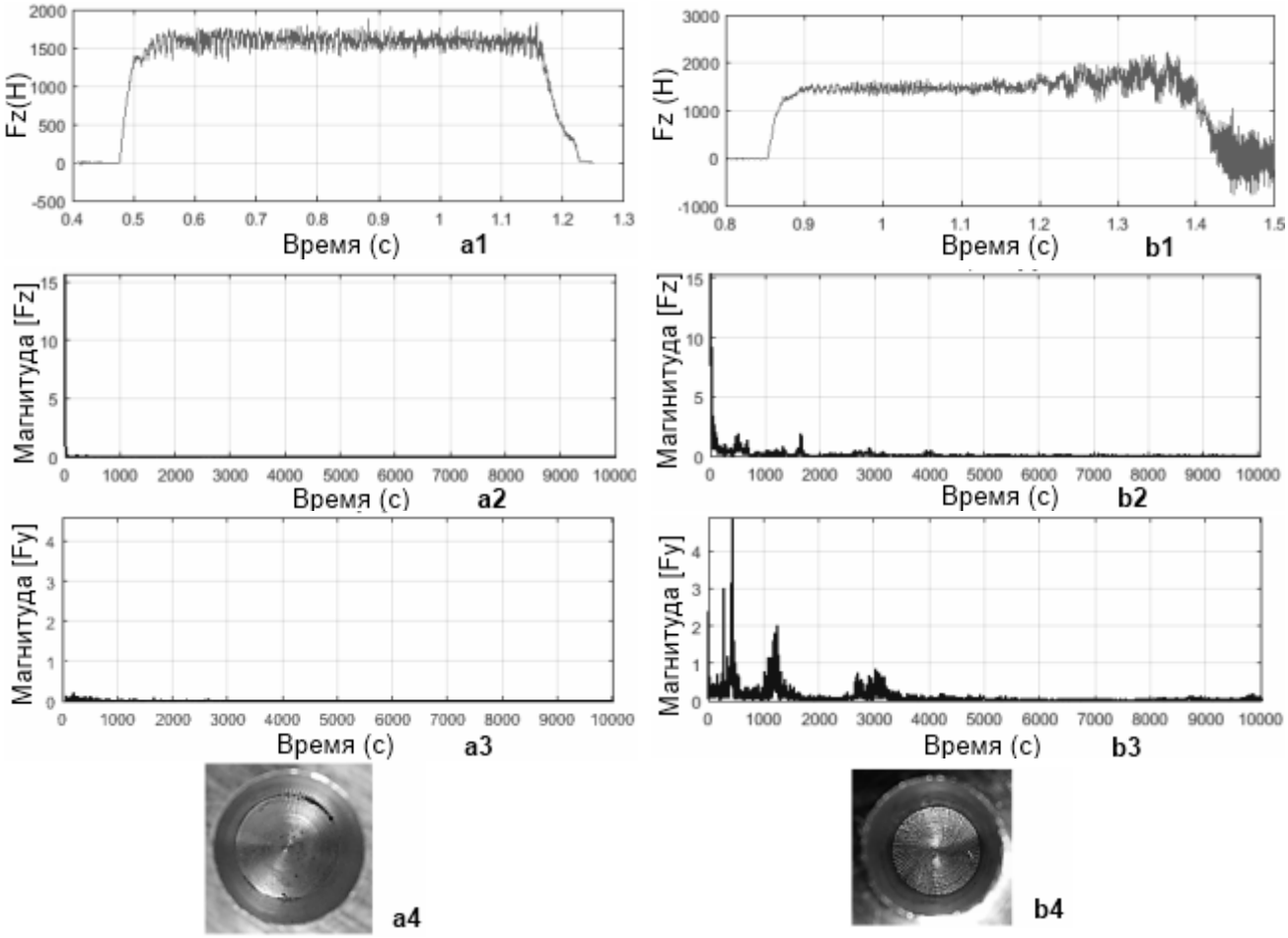


Рис. 4. a1 - сигнал сил резания; a2, a3 – спектры сигнала сил резания; b1 - сигнал сил резания; b2, b3 – спектры сигнала сил резания; a4, b4 – обработанная поверхность дна отверстия

Для проведения тестов была выбрана скорость резания (175 м/мин ≈ 6192 об/мин), входящая в область стабильного резания и скорость резания вне области стабильного резания (225 м/мин ≈ 7961 об/мин).

На каждой из скоростей было просверлено три отверстия и измерены силы резания с помощью динамометрического комплекса Kistler [8]. На рисунке 4 представлены результаты проведенного эксперимента на примере двух отверстий: график осевой силы резания во временной области и результаты спектрального анализа [9]. Также представлены фотографии дна отверстий, полученных при стабильном (a4) и нестабильном (b4) резании.

Диаграмма динамической устойчивости сопоставима с полученными результатами в результате сверления тестовых отверстий.

Результаты данной работы позволяют повысить эффективность обработки отверстий сверлением. Проведенный модальный анализ инструментальный наладки имеет практическую ценность для дальнейших исследований. Полученные результаты в процессе экспериментального исследования соответствуют теоретическим расчетам.

Литература:

1. Кравченко К.Ю. Разработка и обоснование новых режимов в технологии концевого фрезерования при условии обеспечения устойчивого резания. Автореферат дис. канд. техн. наук. - Екатеринбург, 2016. - 18 с.

2. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. 366 p.

3. Орликов М.Л. Динамика станков. К.: Выща шк., 1989. 272 с.
4. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 358 с.
5. Пятых А.С., Савилов А.В., Николаев А.Ю. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий. // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 70-74.
6. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills. // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. Vol. 89. P. 208-220.
7. J. Roukema and Y. Altintas. Generalized Modeling of Drilling Vibrations. Part II. Chatter Stability in Frequency Domain. // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. Vol. 47. 1474-1485.
8. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6(2). С. 476-479.
9. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Оптимизация процесса металлообработки с учетом вибрационных характеристик металлообрабатывающих центров. // Проблемы механики современных машин. 2015. С. 167-172.

Modeling of dynamic stability of drilling process

Pyatykh A.S.[a]

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a]alexess@istu.edu

Keywords: modal analysis, drill, drilling, hydraulical chuck, natural frequency, damping ratio

The article presents the results of the drilling process. Experimental tests were carried out using solid carbide drill. Modal analysis of the tool setups, defined by their own frequency, lateral and torsional-axial modes, damping ratios and modal stiffness was carried out. Dependences have been obtained for calculating the number of spindle revolutions and the rigidity of cutting, the effectiveness of which has been proved by the results of the experiment. The stability lobes are calculated. The holes drilling process was conducted on the machining center in the aluminum alloy V95. The cutting forces were measured and spectral analysis was carried out. Results of the work permit simulation of the hole drilling process, on the basis of which cutting modes are assigned, which ensure a stable drilling process. The results of the work allow simulating the process of drilling holes. Assign cutting modes to ensure a stable drilling process.

УДК 621.914

Комплексный анализ формообразования круговых зубьев цилиндрических колес

Тарапанов А.С.[a], Шаблинская Т.Н.[b]

Орловский государственный университет, ул. Комсомольская, 95, Орел, Россия
[a] tarapanov@rambler.ru, [b] 2007tasha@rambler.ru

Ключевые слова: анализ формообразования, цилиндрические колеса с круговым зубом, припуски

В статье приводится обзор работ, посвященный формообразованию зубьев цилиндрических колес с круговым зубом. Показано, что эксплуатация колес с круговым зубом позволяет снизить металлоемкость передач крутящего момента, повысить плавность и бесшумность работы. Отмечено, что ограничением является дорогостоящая технология изготовления. Рассмотрена высокопроизводительная технология реализации формообразования зубчатых колес среднего модуля, предусматривающая черновой и чистовой проходы. Черновой проход осуществляется зуборезными головками для конических колес с круговым зубом, чистовой – специальным инструментом кольцевой формы. Разработаны математические модели, отражающие получение контура круговых зубьев с эвольвентным профилем в любом сечении и позволяющие получать численные параметры чернового и чистового методов обработки. Указаны перспективы предлагаемой методики анализа для определения сил резания, точности и шероховатости номинальной поверхности.

Эвольвентные колеса за период почти двухвековой эксплуатации доказали свое преимущество перед другими видами зубчатых зацеплений. Они технологичны, так как получить эвольвентный профиль можно движением обката, как инструментальной рейки, так и другого зубчатого колеса. Эвольвентные зубчатые передачи терпимы к колебаниям межосевых расстояний, перекосам осей. Существенным недостатком, ограничивающим их несущую способность, является малая площадь контакта между зубьями, что побуждает к поиску путей решения этой проблемы.

Колеса с круговым зубом продолжают естественное совершенствование эвольвентных зубчатых передач, занимая свое место в ряду: прямозубые, косозубые, шевронные. По всем параметрам - массогабаритным характеристикам, плавности работы, несущей способности, передаваемому крутящему моменту, износостойкости они превосходят в редукторах любых машин как прямозубые, косозубые или шевронные колеса. Круговая форма зубьев повышает их прочность и жесткость, способствуя повышению плавности работы, снижению уровня шума передач под нагрузкой, увеличению долговечности их работы. Практическое подтверждение ожидаемых преимуществ можно наблюдать в переходе на круговые зубья в конических зубчатых передачах.

Исследованием колес с круговым зубом занимались, начиная с середины прошлого века, коллективы исследователей в России и за рубежом. Ряд вопросов, характеризующих зацепление с круговой формой зубьев и методы его изготовления, рассмотрены в работах [1-3]. Круговые зубья доказали свое превосходство над прямолинейными в конических передачах, что отражено в работах ряда отечественных ученых. Подобного эффекта можно ожидать и в передачах цилиндрических колес с круговыми зубьями.

Несмотря на выявленные преимущества и многочисленные исследования, цилиндрические колеса с круговым зубом до последнего времени в реальных конструкциях машин использовались ограничено. Это можно объяснить как ошибочностью некоторых подходов в создании конструкции колес с круговым зубом, так и отсутствием технологии, обеспечивающей высокую производительность изготовления и точность.

Явно ошибочным является нарезание выпуклых и вогнутых сторон зуба одной инструментальной головкой. Выпуклые и вогнутые стороны зубьев приобретут разные радиусы, и попытка сопрягать в передаче такие колеса обречена на неудачу.

Большинство исследователей предлагают нарезать круговые зубья цилиндрических колес инструментами, имеющими в качестве исходного контура трапецеидальный профиль с углом, равным углу зацепления колеса [2], [4, 5]. В этом случае эвольвента с заданным углом исходного контура образуется только в среднем сечении венца. Во всех прочих сечениях профиль будет отличаться от заданного в сторону уменьшения угла зацепления. Такая передача приобретает дополнительный недостаток: при осевом смещении одного колеса относительно другого не только уменьшается ее несущая способность, но и плавность работы, так как у колес начинают сопрягаться участки профилей с разными углами зацепления.

В работах [4], [6, 7] предложено нарезать рабочие поверхности зубьев и участки впадины между зубьями цилиндрической пальцевой фрезой малого диаметра на многокоординатных станках с ЧПУ. С использованием программного комплекса T-Flex созданы параметрические трехмерные модели расчета траектории движения центра сферического концевого участка фрезы. Были подготовлены управляющие программы для пятикоординатного станка с ЧПУ.

Основные недостатки использованной технологии - чрезвычайно низкая производительность, так как формирование впадины между зубьями производится движением подачи режущего инструмента, а не главным движением резания. Способ зубонарезания колес пальцевой фрезой небольшого диаметра в силу своей малой производительности не имеет перспектив для промышленного изготовления зубчатых колес с круговым зубом.

В работе [8] предложено использовать многорезцовый обкатный инструмент с нулевым углом профиля, в котором в качестве зубьев применяются прорезные резцы фирмы Sandvik Coromant [9]. Инструмент позволяет нарезать круговые зубья цилиндрических колес

с высокой производительностью, соизмеримой с традиционным зубонарезанием быстрорежущей червячной фрезой цилиндрических колес с прямолинейными зубьями.

Перспективным направлением повышения производительности обработки круговых зубьев цилиндрических колес является комбинирование способов чистовой и черновой обработки с различными схемами резания. Так для черновой обработки целесообразно применять зуборезные резцовые головки для конических передач с трапецеидальными зубьями с радиальной подачей, обкатыванием или комбинированной подачей, что позволит снизить себестоимость обрабатываемого изделия за счет высокой производительности и низкой стоимости инструмента и оборудования (рис. 1).

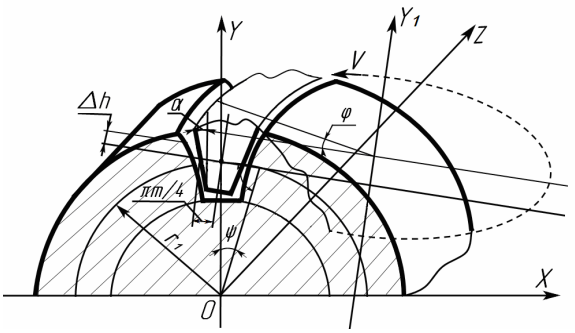


Рис. 1. Разработка математического отображения чернового нарезания цилиндрических арочных зубчатых колес резцовыми головками

Пространство черновой обработки резцовыми головками с трапецеидальными зубьями, в общем, может быть представлено выражением (1) позволяющим контролировать его любую точку. Причем для правого и левого режущего лезвия выражения отличаются (2), (3).

$$\begin{aligned} x &= \left[\pm 0{,}25\pi m \pm \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - \left(r_1 \cdot \psi\right) - r_{0i}\left(1-\cos\varphi\right)\right]\cdot\cos\psi + \left(\Delta h \pm r_1\right)\cdot\sin\psi\ ; \\ y &= \left[\pm 0{,}25\pi m \pm \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - \left(r_1 \cdot \psi\right) - r_{0i}\left(1-\cos\varphi\right)\right]\cdot\sin\psi + \left(\Delta h \pm r_1\right)\cdot\cos\psi\ ; \\ z &= r_{0i}\cdot\sin\psi\ . \end{aligned} \qquad (1)$$

Правая кромка при *φ=0:*

$$\begin{aligned} x &= \left[0{,}25\pi m + \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - r_1 \cdot \psi\right]\cdot\cos\psi + \left(\Delta h + r_1\right)\cdot\sin\psi\ ; \\ y &= \left[0{,}25\pi m + \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - r_1 \cdot \psi\right]\cdot\sin\psi + \left(\Delta h + r_1\right)\cdot\cos\psi\ ; \\ z &= r_{0i}\cdot\sin\psi\ . \end{aligned} \qquad (2)$$

Левая кромка при *φ=0:*

$$\begin{aligned} x &= \left[-0{,}25\pi m - \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - r_1 \cdot \psi\right]\cdot\cos\psi + \left(\Delta h - r_1\right)\cdot\sin\psi\ ; \\ y &= \left[-0{,}25\pi m - \left(\Delta h \cdot tg\alpha\right) - r_1 \cdot \psi\right]\cdot\sin\psi + \left(r_1 - \Delta h\right)\cdot\cos\psi\ ; \\ z &= r_{0i}\cdot\sin\psi\ , \end{aligned} \qquad (3)$$

где *x, y, z* – координаты точки режущего лезвия инструмента в процессе резания;

Δh параметр режущей кромки;

α – угол профиля;

ψ – текущий угол обката;

φ – угол поворота зуба резцовой головки;

r_1 – радиус делительной окружности;

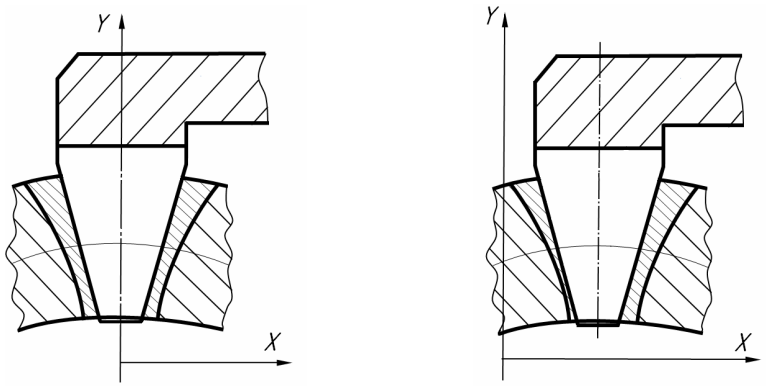
r_{0i} – радиус начальной окружности;

m – модуль зацепления.

При методе формообразования комплектом резцовых головок зубонарезание производится на 4-х координатных фрезерных станках с ЧПУ и токарно-обрабатывающих центрах. При данном методе каждая резцовая головка обрабатывает свою область впадины кругового зуба: черновое прорезание впадины, обработка вогнутой стороны зуба, обработка выпуклой стороны зуба. При этом разделение обработки выпуклой и вогнутой поверхностей на две резцовые головки необходимо для того, чтобы формообразующая точка на вершине угла профиля инструмента в обоих случаях вращалась вокруг оси резцовой головки с одним и тем

же радиусом. Что обеспечивает создание обката выпуклой и вогнутой стороны зуба по идентичным кривым.

Номинальная поверхность, полученная в процессе черновой обработки, позволяет прийти к определению припусков под чистовую обработку (рис. 2).



а) *б)*

Рис. 2. Припуски на чистовую обработку *а* – в осевой плоскости, проходящей через ось инструмента; *б* – в плоскости, соответствующей торцу детали

Задача определения значения припуска Δ для любых значений углов ψ и α_1 сводится к решению треугольника по двум углам и стороне $X\text{-}X_1$ (рис. 3).

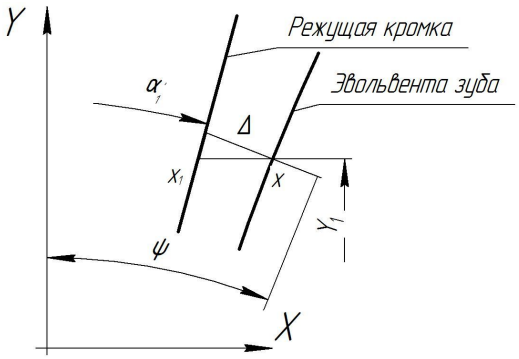


Рис. 3. Определение припусков Δ

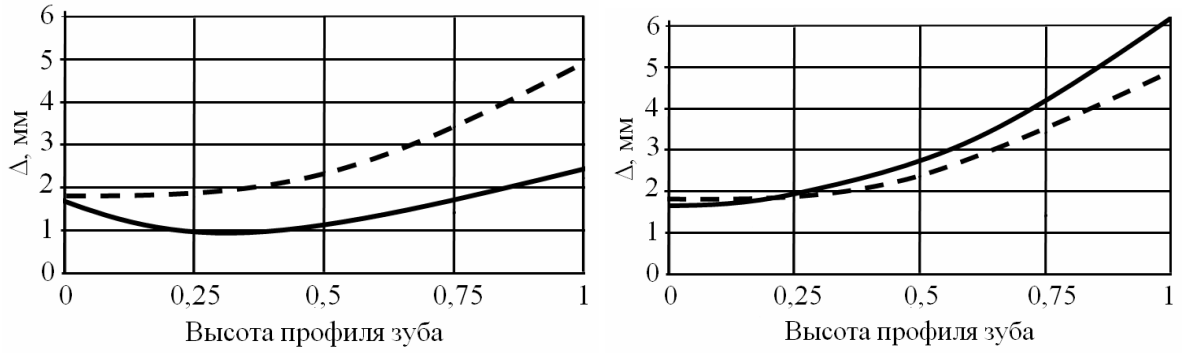
В результате приведенных итераций выявлена зависимость, отображающая значения припусков по всей высоте зуба в любых сечениях перпендикулярных оси колеса в зависимости от параметров обрабатываемого зуба и резцовой головки. Высота зуба на графиках представлена за единицу как безразмерная величина.

Ниже приводятся графики зависимостей припусков на чистовую обработку для двух вариантов входных параметров (рис. 4), представленных в таблице 1.

Таблица 1

Входные параметры для расчета припусков

Параметр	Наименование	Значение	
		Вариант 1	Вариант 2
1	2	3	4
Модуль, мм.	m	8	8
Число зубьев	z	36	20
Угол зацепления, град.	α	20	20
Ширина зубчатого венца, мм.	b	100	100
Радиус кривизны зуба, мм.	r_c	100	100
Радиус окружности центрального сечения режущего зуба, мм.	r_o	100	95
Угол наклона режущей кромки, град.	α_1	12	20
Коэффициент ширины режущего зуба по делительному диаметру, мм.	k	6,5	6



а) б)

Рис. 4. Значения припусков для вогнутой (левой) и выпуклой (правой) сторон зуба в центральном Z = 0 (а) и торцевом Z_{max} = b/2 (б) сечениях, перпендикулярных оси

Таким образом, применение полученной зависимости в дальнейшем позволит оптимизировать припуски на чистовую обработку, прогнозировать значения сил резания для любых начальных параметров, точность при известной жесткости технологической системы, а также шероховатость обрабатываемой поверхности.

Чистовое формообразование круговых зубьев производится специальным инструментом кольцевой формы, позволяющим получать эвольвенту в любой плоскости, пересекающей круговой зуб перпендикулярно оси (рис. 5).

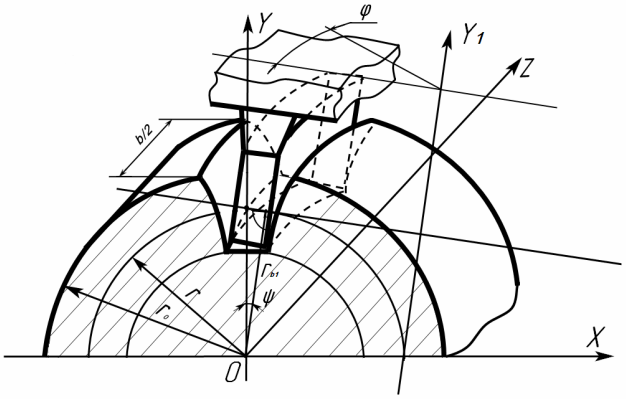


Рис. 5. Схема расчета математического отображения процесса чистовой обработки

Математическое отображение работы режущих лезвий такого инструмента представлено выражением (4).

$$X = r_{b1} \cdot \sin\psi - \left[r_{b1}\psi + \Delta \cdot \cos\varphi - r_0\left(1 - \cos\varphi\right)\right] \cdot \cos\psi ;$$

$$Y = r_{b1} \cdot \cos\psi + \left[r_{b1}\psi + \Delta \cdot \cos\varphi - r_0\left(1 - \cos\varphi\right)\right] \cdot \sin\psi ; \quad (4)$$

$$Z = \left(r_0 + \Delta\right) \cdot \sin\varphi ,$$

где:

ψ – угол между осью OY и линией, проходящей через середину зуба инструмента, обрабатывающего данную впадину колеса в любом его положении;

φ – угол поворота зуба резцовой головки в плоскости XZ;

Δ – параметр режущей кромки (элемент ширины);

b – ширина зубчатого венца колеса;

r_{b1} – радиус начальной окружности;

r – радиус делительной окружности;

r_a – радиус вершины зуба;

r_o – радиус окружности формообразующей точки.

Полученная математическая модель отражает получение контура круговых зубьев с эвольвентным профилем в любых осевых сечениях движения в процессе формообразования, а также устанавливает связь между параметрами скорости, подачи и режущей кромки. В

дальнейшем, развитие предложенного анализа схем резания позволит прогнозировать значения сил резания при обработке зубчатого колеса для любых начальных параметров, точность при известной жесткости технологической системы, а также шероховатость обрабатываемой поверхности [10].

Литература:

1. Бобков М.Н. Теоретические аспекты технологии изготовления цилиндрических колёс с круговыми зубьями // Автореферат дис. д-ра техн. наук - Тула, 1998. - 40 с.

2. Коганов И.А., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Повышение качества и производительности при обработке цилиндрических колес с круговыми зубьями // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием. Тула, 1983. С. 146 - 152.

3. Паршин А.Н. Разработка методов анализа, синтеза зацепления и изготовления арочных цилиндрических зубчатых колес // Автореферат дис. канд. техн. наук - Москва, 2008. - 16 с.

4. Васин В.А., Бобков М.Н. Возможность создания единой обобщенной методики геометрического расчета цилиндрических передач с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Труды международной науч.-техн. конференции, посвященной 100-летаю со дня рождения С.С. Петрухина. Вып. 2. - Инструментальные системы: прошлое, настоящее, будущее. Серия: Машиностроение. ТулГУ, 2003. С. 287 - 291.

5. Васин В.А., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Обработка арочных зубьев цилиндрических колес // СТИН. 2005. № 4. С. 26 - 29.

6. Давыдов А.П., Липатов С.И., Марголит Р.Б., Панков И.Г., Паршин А.Н. Арочная цилиндрическая зубчатая передача: пат. 2469230 Рос. Федерация; заявл. 19.05.2011; №, заявки 2011120157/11, опубл. 10.12.2012.

7. Виноградов А.Н., Липатов С.И., Марголит Р.Б. Точность нарезания колес с арочными зубьями // Технология машиностроения. 2013. № 9. С. 23 - 27.

8. Липатов С.И. Разработка многорезцового обкатного инструмента с нулевым углом профиля для высокопроизводительного зубонарезания арочных колес на станках с ЧПУ // Автореферат канд. техн. наук - Москва, 2013. - 16 с.

9. Sandvik Coromant: сайт. 2014. [Электронный ресурс] / Каталог - URL: http://sandvik-coromant.ru (дата обращения: 23.04.2015).

10. Тарапанов А.С., Харламов Г.А., Шоркин В.С. Математические основы виртуального представления и анализа процессов лезвийной обработки // Справочник. Инженерный журнал. 2003, № 2, С. 11 – 17; № 3, С. 18 – 24.

The complex analysis of shaping circular teeth of cylindrical wheels

Tarapanov A.S.[a], Shablinskaia T.H.[b]

Orel State University, 29, Komsomolskaya st., 95, Orel, Russia
[a]tarapanov@rambler.ru, [b]2007tasha@rambler.ru

Keywords: analysis of shaping, cylindrical wheels with a circular tooth, allowances

The article gives an overview of the works devoted to the shaping of the teeth of cylindrical wheels with a circular tooth. It shows that the use of wheels with a circular tooth can reduce the metal capacity of torque transmissions, improve smoothness and quietness of operation. It notes that the limitation is the expensive manufacturing technology. A high-performance technology of shaping the gears of the middle module is considered, providing for roughing and finishing passes. The rough passage is carried out by gear-cutting heads for bevel gears with a circular tooth, a finishing one - by a special tool of the ring shape. The authors have developed mathematical models that reflect the obtaining of a contour of circular teeth with an involute profile in any section and allow one to obtain numerical parameters of rough and fine processing methods. The paper points the prospects of the proposed analysis technique for determining the cutting forces, accuracy and roughness of the nominal surface.

УДК 621.923.025

Исследование микроструктуры поверхности сплава ТН-20 после комбинированного метода электроалмазной обработки

Лосев Е.Д.[1a], Кузнецов А.М.[1]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]_elk_@mail.ru

Ключевые слова: электроалмазное шлифование, безвольфрамовые твёрдые сплавы, БВТС, алмазный круг, ТН-20

Безвольфрамовые твёрдые сплавы разрабатывались для замены более дорогих вольфрамосодержащих твёрдых сплавов. На сегодняшний день они не получили широкого применения в промышленности вследствие нестабильности их свойств. Данные исследования направлены на выявление причин нестабильности свойств безвольфрамовых твёрдых сплавов с целью их устранения. Во время металлографических исследований пластин из сплава ТН-20 на передних поверхностях были обнаружены кривые белые полосы ″хвосты″. В литературе ранее не было описано это явление, поэтому была поставлена задача, выяснить причину их появления, отличие в химических и физических свойствах материала хвоста, и как конечная цель, определить каково их влияние на качество заточенного инструмента. Проведённые исследования показывают, что размеры и форма «хвостов» зависит от режимов затачивания и что данный дефект присутствует до заточной операции.

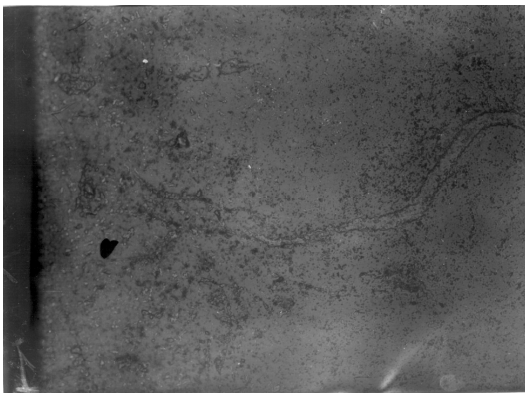
Безвольфрамовые твёрдые сплавы разрабатывались как альтернатива более дорогим сплавам групп ВК и ТК. На данный момент они не получили широкое распространение на производстве в связи с нестабильностью их свойств. На кафедре «Технология машиностроения» БрГУ проводится ряд исследований, целью которых является выявление причин нестабильности свойств БВТС с целью их устранения [1-16]. Как известно из литературного обзора [17-22], затачивание БВТС традиционными методами малоэффективно, поэтому для подготовки инструмента к работе нами используется комбинированный метод электроалмазной обработки [23-25]. Данный вид затачивания позволяет получать высокое качество обработанной поверхности и снизить величину дефектного слоя, и как следствие повысить стойкость режущего инструмента [26-28].

Нами было проведено исследование микроструктуры поверхности сплава ТН-20 после комбинированного метода электроалмазной обработки. Для проведения исследований были выбраны пластины, заточенные на различных режимах резания. Причем при обработке каждой режущей кромки инструмента изменялись такие параметры как:

- скорость круга (от 17 до 52 м/с);
- продольная подача (от 0,5 до 2 м/мин);
- глубина резания (от 0,02 до 0,1 мм/дв. ход);
- ток правки круга (от 0,2 до 1,8 А/см^2);
- ток травления инструмента (от 10 до 40 А/см^2).

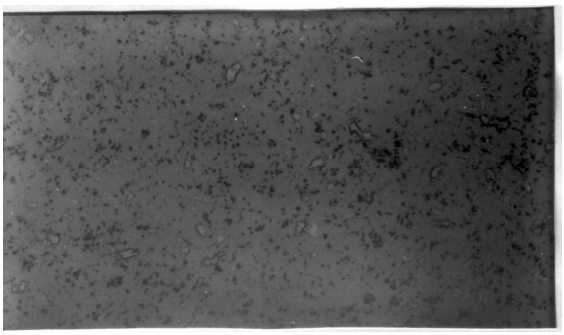
Во время металлографических исследований, с целью выявления наиболее качественно заточенных кромок, на передних поверхностях пластин были обнаружены кривые белые полосы (″хвосты″), которые четко выделились на фоне более темной, основной массы пластины (рис. 1). Так как: в литературе аналогичное явление не упоминается, нами было проведено более углубленное исследование этих ″хвостов″. При этом была поставлена задача, выяснить причину их появления, отличие в химических и физических свойствах материала хвоста, и как конечная цель, определить каково их влияние на качество заточенного инструмента. Для выяснения этих вопросов наряду с металлографическими исследованиями были использованы возможности микроанализатора Link - 860 проводить локальный химический анализ, а также особенности наконечника Кнуппа твердомера малых нагрузок фирмы ″WOLPERT″.

Рис. 1. Внешний вид ″хвоста″ на передней поверхности заточенной пластины ТН -20.
Режимы затачивания: $V_{кр}$=35м/с; S=2м/мин; t=0,03 мм/дв.ход; $i_{тр}$=20А/см^2; $i_{пр}$=0,2 А/см^2



×400
Рис. 2. Передняя поверхность пластины ТН-20

При более широком, охватывающем всю переднюю, поверхность пластины, металлографическом исследовании было замечено, что характерным месторасположением ″хвостов″ является область вдоль режущей кромки (рис. 2, 7), в середине их, как правило, нет (рис. 3), или их количество и размера минимальны.



× 1000

×400

Рис. 3. Середина передней пластины ТН-20
Режимы затачивания:Vкр=35м/с; Sпр=1,25м/мин; t=0,1 мм/дв.ход; iтр=20А/см^2; iпр=0,2А/см^2

Необходимо отметить также тот факт, что на образцах, заточенных на разных режимах резания, количество и размеры ″хвостов″ существенно отличался. Так как количественный критерий оценки подобрать трудно, то зависимость установленных ″хвостов″ от режимов резания невозможно представить в виде графика или таблицы. Поэтому выполнен лишь сравнительный анализ:

1. На передней поверхности пластины, заточенной при скорости резания 26 м/с, продольной подаче 1,25 м/мин, глубине резания 0,03 мм/дв. ход, токе травления 20 А/см^2, токе правки 0,2 А/см^2, ″Хвосты″ наблюдаются в очень небольшом количестве, кроме того мелкие и тонкие. На пластинке, заточенной при скорости резания 35 м/с и неизменных остальных параметрах, они удлиняются, становятся шире, хотя их количество находится примерно в тех же пределах.

При дальнейшем увеличении скорости и достижение ее 52 м/с не замечено явственного изменения размеров ″хвостов″, но количество их возрастает, хотя и незначительно.

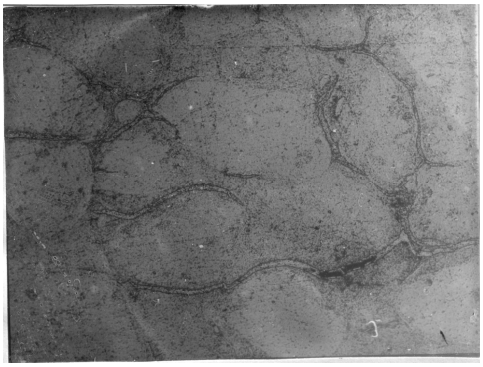
2. При увеличении глубины шлифования от 0,03 до 0,1 мм/дв. ход при скорости круга 35 м/с резко возрастает концентрация ″хвостов″ на поверхности пластины. Покрывая околокромочную поверхность этого сплава, они образуют своеобразную сетку (рис. 4).

3. Аналогичные изменения на пластинках можно наблюдать и при возрастании продольной подачи до 2 м/мин.

В связи с этим можно: упомянуть известный факт, что при увеличении параметров шлифования: скорости круга, продольной и поперечной подач в зоне обработки возрастает контактная температура.

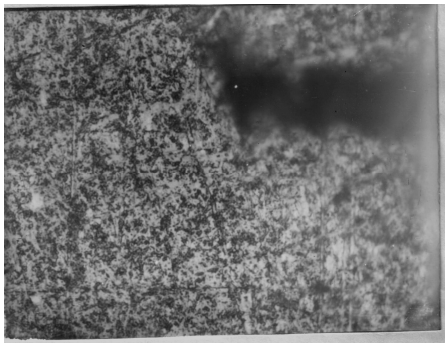
4. Увеличение тока травления пластины не влияет на количественные характеристики ″хвостов″, но приводит к потемнению их окраски. Это свидетельствует о присутствии здесь в большом количестве элементов более легко поддающихся растравливанию.

После дополнительного травления образцов смесью плавиковой и азотной кислот ″хвосты″ растворились, окраска их стала темнее, а контура более четкими (рис. 5, 6).



×100

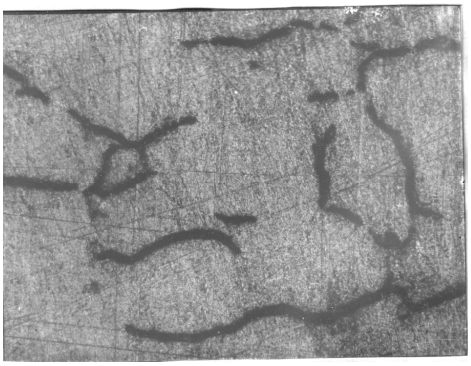
Рис. 4. Передняя поверхность пластины ТН-20 (околокромочная область). Режимы затачивания: V=35 м/мин; S=1,25м/мин; t = 0,1 мм/дв.ход; $i_{тр}$=20А/см^2; $i_{пр}$=0,2А/см^2



×1000

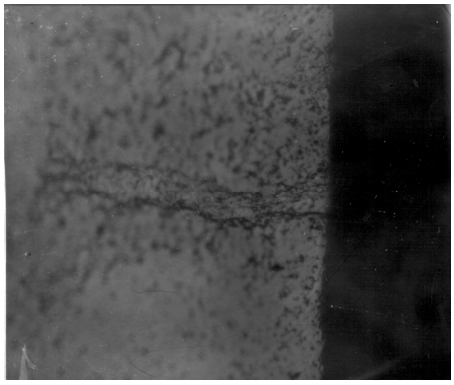
Рис. 5. Передняя поверхность пластины ТН-20 (после применения травителя)

Наряду с отличием в химическом составе, наблюдается значительная разница в микротвердости основного материала пластины ТН-20 и ″хвоста″. Обычное определение твердости с помощью таблиц, производится по числовому значению, полученному путем деления суммы величин обеих диагоналей ромбического отпечатка алмазной пирамиды Виккерса, пополам. Но верное значение твердости применение пирамиды Виккерса не дает, так как в материал ″хвоста″ обе диагонали попасть не могут (концы одной из них упираются в основу твердого сплава, который сдерживает распространение отпечатка).



×100

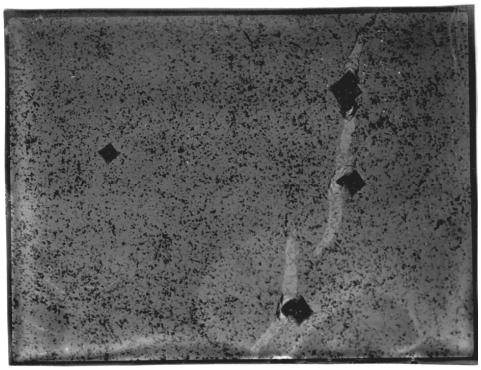
Рис. 6. Внешний вид передней поверхности пластины ТН-20, после травления



×1000

Рис. 7. Передняя поверхность пластины ТН-20 (Кромочная область)

Поэтому измерение микротвердости выполнялось с использованием наконечника Кнуппа (рис. 8, 9) хотя значение твердости по Кнуппу существенно, отличаются от общепринятых (по Виккерсу и Бринелю).



×400

Рис. 8. Отпечатки пирамиды Виккерса на различных участках пластины ТН-20

×400

Рис. 9. Отпечатки наконечника Кнуппа на различных участках передней поверхности пластины ТН-20

Уколы производились на разных образцах пластин и на различных расстояниях от режущей кромки. Данные, обработанные с помощью специальной методики, сведены в таблицу 1. Измерения показали, что твердость материала ″хвоста″ ниже твердости пластины, более чем в два раза.

Таблица 1

Экспериментальные данные исследования микротвердости передней поверхности пластин ТН-20

Место укола	Значение твердости по Кнуппу		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
″Хвост″	898	626	1012
Основной материал пластины	1850	1630	выше шкалы

Для определения точного химического состава ″хвостов″ нами проводился спектральный анализ, который показал, что их основу составляет компонент связки пластины – никель.

На спектре, снятом с "хвоста" пик никеля поднимаемся до максимальной, для этого масштаба высоты, линия падает до уровня обычного содержания молибдена, а количество второго компонента связки – сплава ТН-20, молибдена, вообще снижается до нулевого уровня (рис. 10).

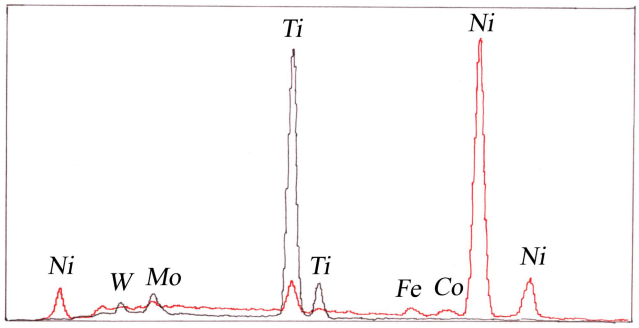


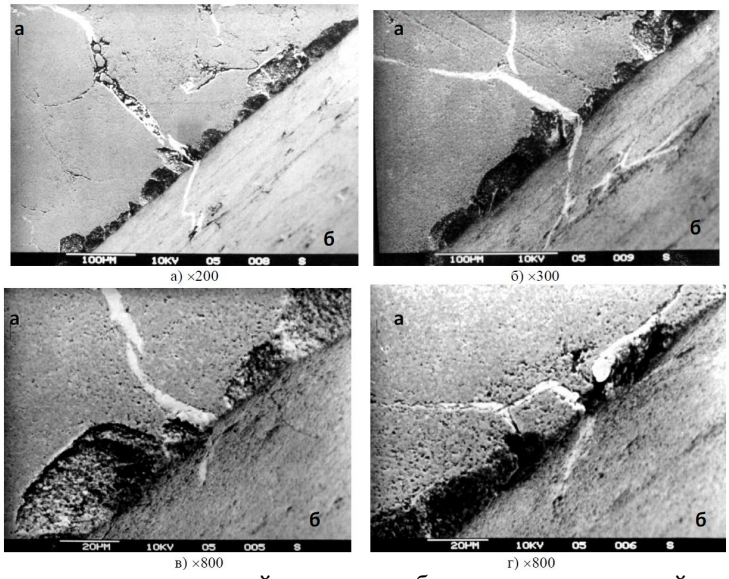
Рис. 10. Спектр с поверхности сплава ТН-20.
-----″Хвост″ -----основа

Нетипичен для этих сплавов и спектр, снятой с соседней с ″хвостом″ области пластины. Хотя содержание титана и молибдена находится здесь, очевидно в обычной своей концентрации, количество никеля резко снижено, а на спектрограмме (рис. 10) вообще находится на нулевом уровне.

Таким образом, никель, который должен был служить связкой карбидам титана и частично образовавшимся карбидам молибдена (т.к. некоторые исследователи считают, что молибден помимо цементирующей фазы, входит в состав карбидной) выделился, очевидно, в самостоятельные образования, обеднив при этом близлежащие области, твердого сплава.

Известно, что карбид титана имеет невысокую прочность на скалывание, а инструменты с высоким содержанием карбида титана хрупки и склонны к излому. Поэтому, неравномерное содержание связки, по объему пластины, в этом случае, будет создавать наиболее слабые области, благоприятные для поломки инструмента. Кроме того, высокие температуры, сопровождающие процесс лезвийной обработки, приводят к возникновению напряжений. Так как коэффициенты линейного расширения карбидов и цементирующей фазы различны между собой, возникают объемные изменения по глубине пластинки и, как следствие этого, высокие напряжения, могущие стать причиной трещинообразования.

Для выяснения причины возникновения ″хвостов″ из той же партии БВТС, была выбрана пластина, не подвергавшаяся затачиванию МДТ. После легкой полировки алмазной пастой, образец изучался на металлографическом микроскопе. При этом на поверхности пластины было обнаружено почти сходное явление: ″хвосты″ имели здесь несколько иную форму (рис. 11). Спектрограмма, снятая с поверхности этого образования, показала состав, в основном аналогичный полученному ранее с ″хвоста″ заточенной пластины.



а) ×200 б) ×300 в) ×800 г) ×800

Рис.11. Вид «хвостов» и состояние режущей кромки, отображенных на передней и задней поверхностях: а – передняя поверхность; б – задняя шлифованная поверхность

Таким образом, причина появления "хвостов" кроется, очевидно, в технологии изготовления твердосплавных пластин. Основные операции техпроцесса производства твердых спеченных сплавов, смешивание исходных порошков в шаровых мельницах, высушивание смеси, формовка и спекание с последующим восстановлением. Происходящие при размоле компонентов смесей процессы, сводятся к разрушению конгломератов, дроблению зерен карбидов и связки, и как завершение, смешивание их между собой. Считается [1], что прочные и твердые сплавы можно получить только при совместном и достаточно длительном размоле смеси.

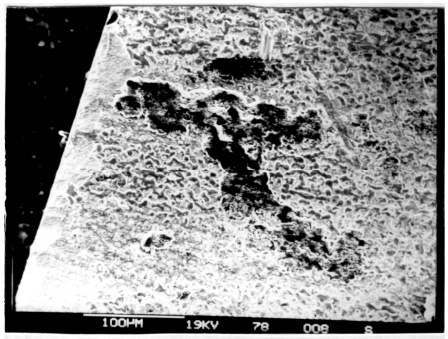
Скорее всего, причину появления описанного выше дефекта следует искать именно на этой стадии технологического процесса.

На спектре, снятом с "хвоста" пик никеля поднимается до максимальной, для этого масштаба высоты, линия титана резко падает до уровня обычного содержания молибдена, а количество второго компонента связки – сплава ТН-20, молибдена, вообще снижается до нулевого уровня. Нетипичен для этих сплавов и спектр, снятой с соседней с ″хвостом″ области пластины. Содержание титана и молибдена находится здесь, очевидно в обычной своей концентрации, количество никеля резко снижено.

Таким образом, никель, который должен был служить связкой карбидам титана и частично образовавшимся карбидам молибдена (т.к. некоторые исследователи считают, что молибден помимо цементирующей фазы, входит в состав карбидной) выделился, очевидно, в

самостоятельные образования, обеднив при этом близлежащие области, твердого сплава.

Известно, что карбид титана имеет невысокую прочность на скалывание, а инструментальные материалы с высоким содержанием карбида титана хрупки и склонны к излому. Поэтому неравномерное содержание связки, по объему пластины, в этом случае, будет создавать наиболее слабые области, благоприятные для поломки инструмента (рис.12).



×250

Рис. 12. Внешний вид поверхности пластины ТН-20, не затачиваемой МДТ

Кроме того, высокие температуры, сопровождающие процесс лезвийной обработки, приводят к возникновению напряжений. Так как коэффициенты линейного расширения карбидов и цементирующей фазы различны между собой, возникают объемные изменения по глубине пластины и, как следствие этого, высокие напряжения, могущие стать причиной трещинообразования.

Для выяснения причины возникновения ″хвостов″ из той же партии пластин БВТС, была выбрана пластина, не подвергавшаяся шлифованию. После легкой полировки алмазной пастой, образец изучался на металлографическом микроскопе. При этом на поверхности пластины было обнаружено почти сходное явление: ″хвосты″ имели здесь несколько иную форму. Спектрограмма, снятая с поверхности этого образования, показала состав, в основном аналогичный полученному ранее с ″хвоста″ шлифованной пластины.

В связи с этим возникает вопрос о преимущественном расположении скоплений никеля вдоль режущей кромки и больших их количествах на пластинках, заточенных на повышенных режимах резания.

Можно считать, что если в результате прессования в одной заготовке будут участки с различной плотностью, это не означает разных их свойств в спеченном изделии, в целом такое изделие не должно отличаться по свойствам от получаемого из заготовки с равномерной плотностью [12]. Кроме того, автор работы [14] показали, что при исследовании микроструктуры участков образца твердого сплава с разной плотностью, различий не наблюдается. Поэтому вероятнее всего, связать полученный факт расположения ″хвостов″ с процессом затачивания пластин.

Очевидно, области на исходных пластинках сплава ТН-20, которые содержали более значительное количество никеля, во время обработки пластин стали центром, куда в результате действия высоких температур и давлений начал стягиваться никель из соседних участков. Это предположение и подтверждается тем фактом, что большее количество и размеры хвостов были на пластинках, процесс обработки которых сопровождали более высокие температуры резания. Отсюда и концентрация никелевых скоплений в околокромочных областях.

Литература:

1. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании // Москва, 2004.
2. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Лосев Е.Д., Петров Н.П. Подготовка режущего инструмента для гибких автоматизированных производств // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 78-81.
3. Янюшкин А.С., Ереско С.П., Лобанов Д.В., Сурьев А.А., Кузнецов А.М. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга // патент на изобретение RUS 2239525 25.02.2003

4. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. 2013. № 2 (22). С. 32-37.

5. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62-69.

6. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Исследование поверхности алмазных кругов после комбинированной электроалмазной обработки быстрорежущей стали // Технология машиностроения. 2013. № 11. С. 26-30.

7. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // Технология металлов. 2010. № 1. С. 25-33.

8. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Якимов С.А., Архипов П.В. О механизме разрушения зерен алмаза в процессе электроалмазного шлифования // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 34-36.

9. Янюшкин А.С., Сурьев А.А., Иващенко Р.А., Архипов П.В., Якимов С.А., Лосев А.Б. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления // патент на изобретение RUS 2304504 31.01.2005

10. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Янюшкин Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2000. Т. 1. С. 189-190.

11. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 178-183.

12. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов // Москва, 2003.

13. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Васильев Е.В., Попов А.Ю. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей // Братск, 2009.

14. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации // Старый Оскол, 2013.

15. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 42-46.

16. Лобанов Д.В., Лосев Е.Д., Кирпикова Е.И., Янюшкин А.С. Методика оценки комбинированных методов электроалмазной обработки твердых сплавов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2012. Т. 1. № 8. С. 152-153.

17. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 95-98.

18. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Лосев Е.Д. Качество поверхности после алмазной обработки безвольфрамовых твердых сплавов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. № 1 (55). С. 20-24.

19. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Ереско С.П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 26-31.

20. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Медведева О.И., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сурьев А.А. Применение алмазных кругов на металлической связке для комплексной подготовки металлорежущего инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 105-109.

21. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов // Д. В. Лобанов, А. С. Янюшкин; М-во образования и науки РФ, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Братский гос. ун-т". Братск, 2011.

22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Батаев В.А., Архипов П.В., Медведева О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 7. С. 87-91.

23. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Сурьев А.А.Качество инструмента из инструментальных сталей после обработки методом двойного травления // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2003. Т. 2. С. 206-212.

24. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Медведева О.И., Скиба В.Ю. Контактные процессы при алмазной обработке инструментальных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 68-74.

25. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Лобанов Д.В. Состояние твердотельного инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук высшей школы РФ. 2006. № 2. С. 100-104.

26. Медведева О.И., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68-75.

27. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2011. № 3. С. 50-53.

28. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Исследование качества поверхности при формировании режущей кромки фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 582-588.

Investigation of the microstructure of the surface of TN-20 alloy after the combined electric diamond grinding

Losev E.D.[1a], Kuznetsov A.M.[1]

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia
[a]_elk_@mail.ru

Keywords: electric diamond grinding, tungsten free hard alloys, TFHA, diamond wheel, TN-20

Tungsten free hard alloys were developed to replace more expensive tungsten-containing hard alloys. To date, they have not been widely used in industry due to the instability of their properties. The given researches are directed on revealing the reasons of instability of properties of tungsten free hard alloys with the purpose of their elimination. During the metallographic studies of plates made of TN-20 alloy on the front surfaces, the curves "tails" were found. In the literature, this phenomenon was not previously described, therefore, the task was set, to determine the cause of their appearance, the difference in the chemical and physical properties of the tail material, and as an ultimate goal, to determine what their impact on the quality of the grinded tool. The conducted studies show that the size and shape of the "tails" depends on the grinding regimes and that this defect is present before the grinding operation.

УДК 621.9

Системы автоматизированного проектирования технологических процессов с систематизацией информации о режущих инструментах

Селина О.В.[a], Кувырдина И.Н.[b], Иванов А.В.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]techmash@brstu.ru, [b]kuvyrdinai@mail.ru, [c]ivanovav92@gmail.com

Ключевые слова: САПР, режущий инструмент, технологический процесс

Представлены исследования систем автоматизированного проектирования технологических процессов, в которых реализована систематизация режущего инструмента. Существующие системы позволяют автоматизировать инструментальный контроль и выбирать режущий инструмент для различных технологических операций. Однако в них не применяются методики рационализации параметров технологического процесса. В настоящем исследовании систематизация информации о режущих инструментах при его выборе или проектировании для технологических процессов обработки осуществляется посредством баз данных. Разработана программа, содержащая несколько диалоговых окон, с помощью которых производится описание конструктивных составляющих и параметров фрезерного инструмента, а также производится поиск, добавление и изменение информации. Применение программы существенно сократит время на поиск и обработку информации по режущим инструментам, подлежащим анализу, упростит метода редактирования, составления и хранения базы данных инструментов и автоматизирует процесс разработки технологии изготовления деталей технологами и конструкторами.

Введение. При проектировании технологического процесса обработки деталей важным этапом является выбор режущего инструмента, обеспечивающего высокие качественные (шероховатость поверхности, точность размеров и т.п.) и количественные (производительность обработки, работоспособность инструмента) показатели процесса резания [1 – 9]. Номенклатура конструкций режущих инструментов, применяемых в настоящее время в промышленности, весьма обширна. Это вызывает трудности при выборе рациональных характеристик режущего инструмента, усложняет работу технологов и конструкторов, занимающих-

ся подготовкой производственного процесса, а также увеличивает трудоемкость проектирования технологии изготовления деталей [10–14].

Одним из путей решения представленных проблем является создание программного обеспечения, позволяющего накапливать, хранить и проводить обработку информации о конструкциях режущих инструментов.

Существует множество САПР, включающих обработку и хранение информации о режущих инструментах и технологической оснастке [15–17]. Одной из таких САПР является информационная система *TechnologiCS*, предназначенная для решения различного рода практических задач. В этой системе производится учет дорогостоящего (номерного) инструмента и контроль над его использованием в производстве [15].

В системе *TechnologiCS* производится комплексное решение проблемы автоматизации инструментального контроля. На этапе конструкторской и технологической подготовки производства определяется инструмент и оснастка, которые будут использоваться в процессе изготовления конкретных деталей. Программа учитывает, существует ли инструмент и оснастка различных наименований в наличии, оценивает текущее количество каждого наименования – отдельно по номерам или партиям либо общее, историю перемещения (поступление / прием / выдача / списание и т.д.) по всем позициям. Также есть возможность отследить параметры необходимых инструментов и оснастки [15]. Автоматизация ввода данных об использовании инструмента, выдаче или перемещении осуществляется посредством механизма штрихового кодирования.

Одной из распространенных в производстве систем автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства является программа *ADEM-VX*, которая имеет инструментарий для технологов (*CAPP*), конструкторов (*CAD*) и программистов ЧПУ (*CAM*). Система позволяет создавать технологические маршруты производства деталей и управляющие программы с расчетными технологическими параметрами, такими как скорость резания, подача, глубина и т.д. В программе следует ввести исходные данных для проектирования технологической операции, после чего автоматически будет построен весь маршрут обработки, назначен режущий и мерительный инструмент и произведен расчет режимов резания. Также имеется возможность изучения в программе рекомендаций по выбору оснастки и режущего инструмента [16].

Выбор режущего инструмента в зависимости от качества обработанной поверхности и точности размеров можно производить в комплексе *T-FLEX* для проектирования операций (модуль «Технология v.10»). В этой программе содержатся электронные справочники, имеющие около 64 тыс. записей режущих инструментов, приспособлений, оборудования, измерительных, вспомогательных и слесарно-сборочных инструментов и СОЖ. Указав соответствующие характеристики детали, можно выбрать режущий инструмент из этих электронных справочников [17].

Для проектирования фрезерных операций на многокоординатных станках с ЧПУ разработана программа *SolidWorks* с модулем *CAMWorks*. В модуле производится расчет траектории, по которой должен двигаться режущий инструмент при выполнении каждой операции. После этого выполняется выбор фрез в зависимости от того, какое качества обработанной поверхности необходимо получить.

Модуль *CAMWorks* содержит интеллектуальную базу данных, в которой хранится и дополняется по мере необходимости различная технологическая информация. Работает модуль посредством установления совокупности операций для выполнения в изделии необходимого элемента. Для каждой операции устанавливаются значения по умолчанию всех параметров (схема обработки, правила врезания в материал, припуски, подводы и отводы инструмента, плоскости переходов и т.д.), правила выбора режимов резания и правила подбора инструмента.

Таким образом, существующие системы в области автоматизированного проектирования технологических процессов частично решают проблему хранения инструментов и оснастки, а также проблему обработки информации о них. Кроме того, для каждой отдельной

операции широко используются правила выбора режущих инструментов. Однако в них не применяются методики рационализации параметров технологического процесса.

Программное обеспечение для формирования базы данных режущих инструментов. Систематизация информации о режущих инструментах при его выборе или проектировании для технологических процессов обработки осуществляется посредством баз данных [18 – 30].

В приложении *Microsoft Office Access*, разработана программа, позволяющая составлять базу данных фрезерных инструментов. Данная программа содержит несколько диалоговых окон, с помощью которых можно описать конструктивные составляющие и параметры фрезерного инструмента, а также позволяет производить поиск, добавление или изменение информации (рис. 1 – 5).

В программе применяется ряд данных, различающихся по типам, которые необходимы для работы описательных функций:

- числовой тип данных;
- логический тип данных;
- текстовый тип данных;
- графический тип данных, служит для хранения графической информации.

Помимо использования этих типов информационных данных удобная и продуктивная работа с базой данных обеспечивается функциями базы знаний программы. Она содержит информацию, которая косвенно необходима для того, чтобы описать конструктивные особенности режущего инструмента. В базе знаний должны содержаться сведения об обрабатываемых и инструментальных материалах, их физико-механических свойствах, назначении инструмента, материалах корпусной части и т.п.

На рис. 1 представлено диалоговое окно с открытой вкладкой «Исполнение», в которой указывается, является ли режущая часть инструмента сборной и, если да, то какой вид крепления применяется. Во вкладке «Материал» (рис. 2) необходимо указать материал режущей части, который выбирается из базы знаний программы.

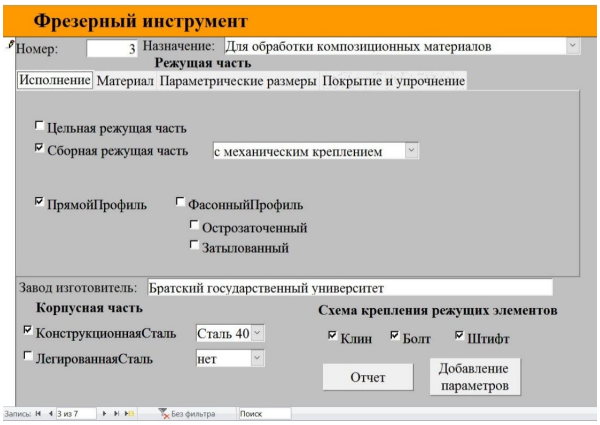


Рис. 1. Диалоговая форма описания режущего инструмента: вкладка «Исполнение»

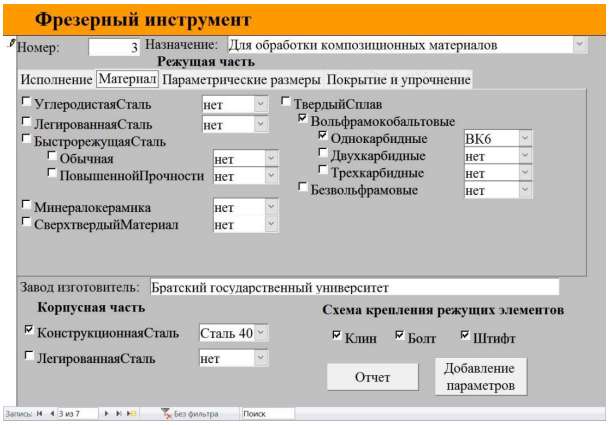


Рис. 2. Диалоговая форма описания режущего инструмента: вкладка «Материал»

Чтобы выбрать материал режущей части необходимо поставить галочку напротив соответствующей группы инструментальных материалов, после чего из раскрывающегося списка выбрать марку. При этом реализовано взаимоисключение выбора одновременно нескольких инструментальных материалов.

Размерные и геометрические характеристики режущей части вносятся во вкладке «Параметрические размеры» (рис. 3). Сюда входит диаметр резания, длина, ширина и высота режущих вставок, передний и задний углы.

Кроме основной информации пользователю предлагается указать применены ли к режущей части различные методы упрочнения. Для этого нужно перейти во вкладку «Покрытие и упрочнение» (рис. 4), где реализована возможность выбора материала и толщины покрытия, а также вида и глубины упрочнения.

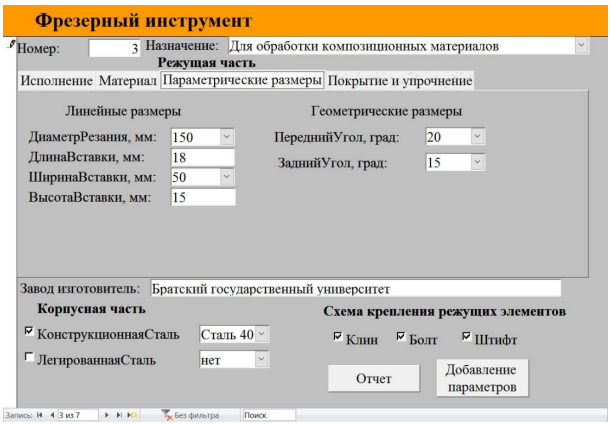


Рис. 3. Диалоговая форма описания режущего инструмента: вкладка «Параметрические размеры»

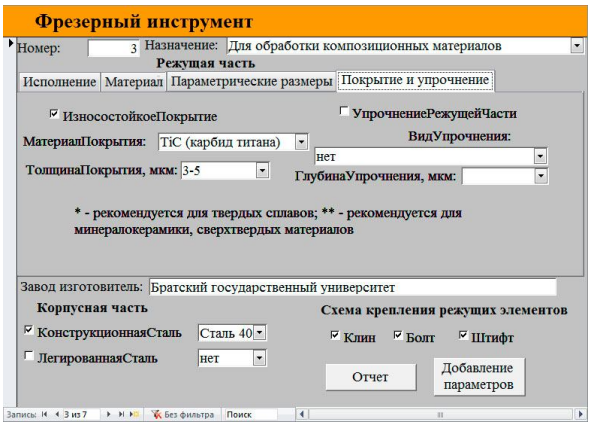
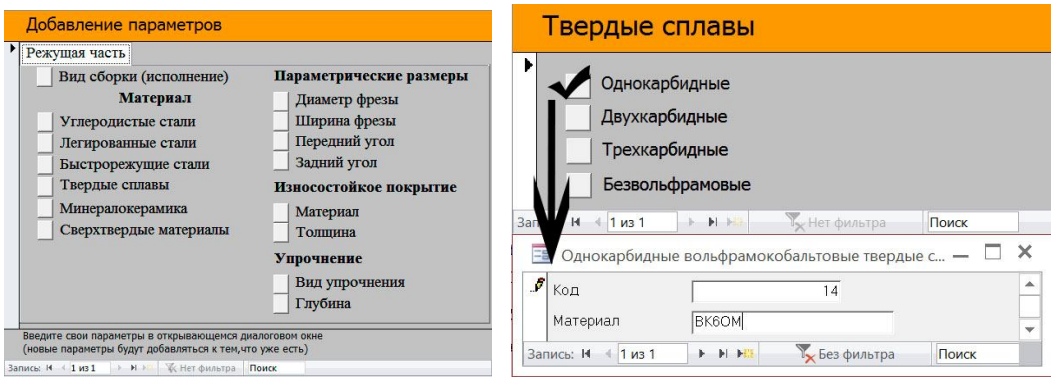


Рис. 4. Диалоговая форма описания режущего инструмента: вкладка «Покрытие и упрочнение»

Если раскрывающиеся списки не содержат необходимую для пользователя информацию, то необходимо вручную дополнить базу знаний программы. Добавление нужных параметров предусмотрено в дополнительном диалоговом окне, доступ к которому производится нажатием на кнопку «Добавление параметров» (рис. 5, а). Представленная форма диалогового окна дает возможность дополнять информацию для существующих списков. Далее, путем нажатия соответствующей кнопки, активируется раздел, в который необходимо внести новые данные и параметры. После этого открывается диалоговое окно, позволяющее пользователю редактировать связанные таблицы базы знаний (рис. 5, б).



а) *б)*

Рис. 5. Диалоговые формы для добавления параметров

Для вывода информации на печать существует возможность создания отчета в автоматическом режиме по требуемой конструкции инструмента, который содержит всю внесенную в форму информацию. Созданный отчет также может быть сохранен в файл и отредактирован, при необходимости пользователем.

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Существующие системы в области автоматизированного проектирования технологических процессов частично решают проблему хранения инструментов и оснастки, а также проблему обработки информации о них;

2. САПР не используют методики рационализации параметров технологического процесса;

3. Разработана программа для систематизации информации о режущих инструментах, база данных которой применяется для проектирования технологических процессов;

4. Применение программы существенно сократит время на поиск и обработку информации по режущим инструментам, подлежащим анализу, упростит метода редактирования, составления и хранения базы данных инструментов и автоматизирует процесс разработки технологии изготовления деталей технологами и конструкторами.

Литература:

1. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Исследование качества поверхности при формировании режущей кромки фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 582 – 588.
2. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 91 – 94.
3. Рычков Д.А. Определение периода стойкости режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // Потенциал современной науки. 2014. № 2. С. 48 – 52.
4. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Исследование качества поверхности при формировании режущей кромки фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. С. 582 – 588.
5. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Производительность непрерывной обработки резанием стеклонаполненных полимеров // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2 (26). С. 32 – 43.
6. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Surface quality of the fiberglass composite material after milling, Applied mechanics and materials. 2014. № 682. P. 183 – 187.
7. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // Инновационные технологии и экономика в машиностроении. 2014. С. 343 – 347.
8. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Экономическая эффективность обработки резанием полимерных композиционных материалов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 172.
9. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146 – 149.
10. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // Procedia Engineering. 2016. С. 942 – 947.
11. Рычков Д.А., Янюшкин А.С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 3 (72). С. 23 – 30.
12. Рычков Д.А. Рационализация параметров фрезерования полимерных композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 100 – 105.
13. Кузнецов А.М., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Слепенко Е.А., Рычков Д.А. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твёрдосплавным инструментом // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 196 – 200.
14. Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Повышение эффективности процесса подготовки производства изделий из композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 1 (74). С. 20 – 29.
15. Чилингаров К.А. Учет использования номерного инструмента в производстве с применением системы TechnologiCS // САПР и графика. 2007. №11. С. 26 – 31.
16. Каменев Е.М. Система автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства ADEM-VX // САПР и графика. 2007. №12. С. 14 – 19.
17. Иванов В.В. Программный комплекс T-FLEX Технология 10 // САПР и графика. 2006. №9. С. 44 – 47.
18. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Критериальная оценка конструкции режущего инструмента на примере сборной фрезы для обработки композиционных материалов // Главный механик. 2011. № 5. С. 48 – 54.
19. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // САПР и графика. 2011. № 3 (173). С. 71 – 73.
20. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Петров Н.П. Методика формирования базы данных режущих инструментов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 143 – 146.
21. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях // Ползуновский альманах. 2008. № 4. С. 214 – 216.
22. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Моделирование режущего инструмента для обработки композиционных древесных материалов // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук высшей школы РФ. 2009. № 2. С. 159 – 162.
23. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Automation tool preparation in the conditions of production, Applied Mechanics and Materials. 2015. № 770. P. 739 – 743.
24. Рычков Д.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Автоматизация процесса выбора конструкции режущего инструмента // Механики XXI веку. 2008. № 7. С. 161 – 164.
25. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация технологической подготовки производства при выборе режущего инструмента // Мир техники и технологий. 2013. № 6. С. 36 – 38.
26. Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 327 – 331.
27. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Повышение эффективности производства за счет автоматизации подготовки режущего инструмента // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 4 (46). С. 25 – 30.

28. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Лосев Е.Д. Режущий инструмент для обработки композиционных материалов: его систематизация и выбор рациональной конструкции // Механики XXI веку. 2012. № 11. С. 234 – 238.

29. Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 2 (63). С. 6 – 13.

30. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2015. Т. 15. № 1. С. 35 – 46.

Systems of automated design of technological processes with systematization of information about cutting tools

Selina O.V.[a], Kuvyrdina I.N.[b], Ivanov A.V.[c]

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russia
[a]techmash@brstu.ru, [b]kuvyrdinai@mail.ru, [c]ivanovav92@gmail.com

Keywords: CAD, cutting tool, technological process

The research of the systems of automated design of technological processes in which the systematization of the cutting tool is realized is presented. Existing systems allow you to automate instrumental control and choose a cutting tool for various technological operations. However, they do not use methods to rationalize the parameters of the technological process. In this study, the systematization of information about cutting tools when selecting or designing it for processing processes is carried out through databases. A program has been developed that contains several dialog boxes that help to describe the structural components and parameters of the milling tool, and also search, add and modify information. Application of the program will significantly shorten the time for searching and processing information on cutting tools to be analyzed, simplify the method of editing, compiling and storing the database of tools and automates the process of developing technology for manufacturing parts by technologists and designers.

УДК 621.914

Совершенствование чистового фрезерования вогнутых поверхностей на станках с чпу

Малютин Г.Е.

Липецкий государственный технический университет, ул. Московская, 30, Липецк, Россия
malgena@rambler.ru

Ключевые слова: объемное фрезерование, необработанные зоны, производительность

В статье рассматривается проблема повышения производительности чистового объемного фрезерования зон, оставшихся необработанными после получистового фрезерования. Применение адаптивных устройств на импортных станках - UNOVA (США), YAMAZAKI MAZAK (Япония) - позволило осуществить управление режимами обработки, но стоимость данной опции составляет 20-30 % от стоимости оборудования и их применение при объемном фрезеровании ограничено, так как данные устройства реагируют на изменение в зоне резания с некоторым запаздыванием. Современные системы ЧПУ позволяют не только считывать информацию, но также производить математические расчеты (тригонометрические, логарифмические, логические), и если в управляющую программу «прописать» расчетно – исполнительные команды по определению геометрии зоны резания, то можно проводить регулирование процесса резания без применения дополнительных устройств.

Введение. Современные фрезерные станки с ЧПУ позволяют обрабатывать детали с фасонными поверхностями сложной конфигурации, которые в сечении состоят из набора кривых второго или третьего порядка (круг, эллипс, парабола, гипербола). В производствен-

ных условиях процесс механической обработки таких поверхностей включает в себя послойное обдирочное, получистовое и объемное чистовое фрезерование.

Черновая объемная обработка, как правило, производится цилиндрическими фрезами, после которого на поверхностях остается ступенчатый припуск на дальнейшую обработку, а на деталях с вогнутыми поверхностями - необработанные зоны (рис.1).

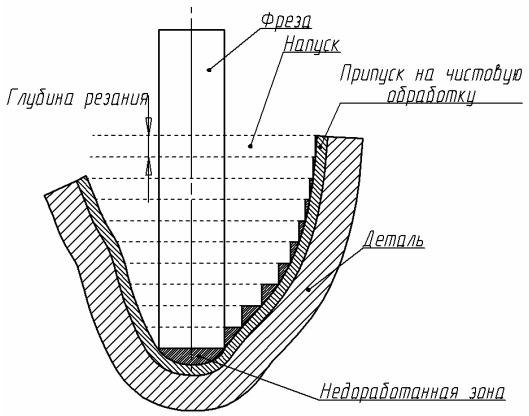


Рис.1. Схема послойного чернового фрезерования и образования необработанных зон

Чистовая обработка таких поверхностей ведется концевыми фрезами со сферическим торцом по нормали к обрабатываемой поверхности. А так как геометрические параметры зоны резания постоянно меняются (глубина резания, угол контакта обрабатываемой поверхности с инструментом), усилия резания имеют непостоянные значения на различных участках, это приводит к погрешности формы при обработке, а при критических значениях усилий резания - к поломке инструмента.

Теория. Регулирование режимов обработки может осуществляться автоматическими системами с обратной связью, принцип работы которых основан на отслеживании изменений в зоне резания (изменение частотных колебаний, температуры, усилий резания) и корректировке значений подачи. Применение адаптивных устройств на станках UNOVA (США), YAMAZAKI MAZAK (Япония) позволило осуществить управление режимами обработки, но стоимость данной опции составляет 20-30 % от стоимости оборудования и их применение при объемном фрезеровании ограничено, так как данные устройства реагируют на изменение в зоне резания с некоторым запаздыванием.

Поэтому назначение рациональных режимов резания на любом участке обрабатываемой поверхности должно быть проведено на стадии разработки управляющей программы.

Разработать процесс обработки для контура, не имеющего сложный профиль, с покадровым изменением режимов резания «вручную» не составляет особого труда, но для объемного фрезерования, где объем управляющих программ в некоторых случаях превышает десятки мегабайт, требуется применение CAM систем.

Регулирование силовых параметров процесса резания в CAM системах в настоящее время не решено; только в новых версиях таких систем как UNIGRAPHICS, CATIA, PRO/ENGINEER разработчиками предлагается проводить оптимизацию подачи по наличию «ДНА» обрабатываемой поверхности, при этом геометрия зоны обработки не учитывается.

Современные системы ЧПУ позволяют не только считывать информацию, но также производить математические расчеты (тригонометрические, логарифмические, логические), и если в управляющую программу «ПРОПИСАТЬ» расчетно – исполнительные команды по определению геометрии зоны резания, то можно проводить регулирование процесса резания без применения дополнительных устройств.

Известно [1], что изменение усилий резания приводит к изменению упругих перемещений инструмента

$$\Delta N = \frac{\Delta X \frac{\partial Z}{\partial X} + \Delta Y \frac{\partial Z}{\partial Y} + \Delta Z}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}} \quad (1)$$

где ΔX, ΔY, ΔZ – величины упругих перемещений по соответствующим осям;

$\frac{\partial Z}{\partial X}$, $\frac{\partial Z}{\partial Y}$ -частные производные функции Z = Φ(X, Y) по аргументам X и Y (тангенсы углов наклона касательных к обрабатываемой поверхности).

При механической обработке концевыми фрезами основная доля упругих деформаций приходится на инструмент, по этой причине в дальнейшем будем учитывать только жесткость фрезы в радиальном направлении

$$J_{фр.} = \frac{3EJ_{пр}}{l^3} \quad (2)$$

где E – модуль упругости первого рода; l – вылет инструмента; $J_{пр.}$ - приведенный момент инерции.

Учитывая, что величина осевого упругого перемещения инструмента близка к нулю, а

$$J_{пр} = J_X = J_Y = \frac{\pi D^4}{64} \approx \approx 0{,}05D^4 = 0{,}8R_{фр.}^4 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow J_{фр.} = J_X = J_Y = \frac{2{,}4ER_{фр.}^4}{l^3}; \quad (3)$$

выражение (1) примет вид:

$$\Delta N = \left(\left(\left(P_Z^{\Sigma} \bullet \sin\psi - P_Y^{\Sigma} \bullet \cos\psi\right)\frac{\partial Z}{\partial X} + + \left(P_Z^{\Sigma} \bullet \cos\psi + P_Y^{\Sigma} \bullet \sin\psi\right)\frac{\partial Z}{\partial Y}\right) \bullet \bullet \frac{l^3}{2{,}4ER_{фр.}^4}\right) \bullet$$
$$\bullet \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}}; \quad (4)$$

Расчет составляющей усилий резания P_z для различных участков обрабатываемой поверхности проводится по выражениям [2, 3]:

$$dP_z^{\Sigma} = 0{,}252\sigma_i R_{фр.}\left(AR_{mp.}^{-0{,}8} + B\right) \bullet \bullet \left(15{,}87F_{зуб.}\sqrt{\frac{T}{2R_{фр.}}} + + I_з tg\left(80 + \lambda - 2\arcsin\frac{1}{K}\right)\right), \quad (5)$$

где σ_i – интенсивность напряжений при резании; $R_{фр.}$– радиус сферы инструмента; φ – угол профиля фрезы; $R_{фр}$ – радиус фрезы; $l_з$ – степень износа зуба; $F_{зуб.}$– подача; H = T – глубина резания (для первого прохода, для последующих L – расстояние между проходами); $\Delta\gamma$ – угол контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью; K – коэффициент усадки стружки [4, 5];

$$\Delta K_{a\sin} = \sin\left(V\left(65{,}79 \bullet F_{зуб}^{2{,}0654}\right)\right) \bullet \bullet \left(K_{a\max} - 1\right) + 1 \quad (6)$$

V – скорость резания.

Для обеспечения постоянства точности на всей обрабатываемой поверхности необходимо выполнить условие:

$$\Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = \Delta N_i = const$$
$$\Rightarrow \frac{\Delta N_{i+1}}{\Delta N_{i+2}} \approx 1; \quad (7)$$

Осуществить управление эквивалентной силой резания $P_{э.}$, при изменении геометрии зоны обработки, можно изменением кинематических параметров - скорости и подачи.

Преобразовав вышеприведенные выражения, получим зависимости для расчета подачи на любом участке обрабатываемой поверхности с учетом геометрических, скоростных изменений и допустимой погрешности обработки:

1) Подача на первом проходе

$$F_{зуб.} = \left(\frac{4{,}76\, ER_{фр.}^{3}\, \Delta N \sqrt{2\cos\alpha^{2}+1}}{\sigma_i \varphi l^{3} \cos\alpha} - I_з tg(80+\lambda) + 9 I_з \right) \bullet$$

$$\bullet \frac{1}{\left(15{,}87 \sqrt{\frac{T}{2R_{фр.}}} + 30\, I_з \sin\left(\frac{V}{2{,}23}\right) \right)} \qquad (8)$$

2) Подача на втором и последующих проходах

$$F_{зуб.} = \left(\frac{4{,}76\, ER_{фр.}^{3}\, \Delta N \sqrt{2\cos\alpha^{2}+1}}{\sigma_i \varphi l^{3} \cos\alpha} - I_з tg(80+\lambda) + 9 I_з \right) \bullet$$

$$\bullet \frac{1}{\left(15{,}87 \sqrt{\frac{L}{2R_{фр.}}} + 30\, I_з \sin\left(\frac{V}{2{,}23}\right) \right)} \qquad (9)$$

где φ – угол контакта режущей кромки с обрабатываемой поверхностью в зоне резания [6].

Результаты и обсуждение. С целью проверки выражения (8) были проведены эксперименты по определению влияния меняющейся геометрии зоны обработки на силы резания. Инструмент – фреза сферическая фирмы HANITA диаметром 10 мм, радиус сферы торца R = 5 мм, длина режущей части L_1 = 30 мм, вылет L_2 = 50 мм.

Экспериментальный образец – параллелипед 62х40х35 (рис.2), материал – нержавеющая сталь 40Х13, твердостью HRCэ 40…45. Радиус обрабатываемой поверхности $R_{пов.}$ = 20 мм. Предварительный припуск на обработку Т = 0,2 мм.

Оборудование – трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ 6Б52Ф3, динамометр УДМ-600 с выводом сигнала на персональный компьютер.

Рис.2. Схема обработки образца

Эксперименты проводились как на постоянных, так и на переменных режимах резания.

В первом случае минутная подача устанавливалась по наиболее загруженному участку (ранее необработанная зона) по рекомендациям производителя режущего инструмента – F = 10 мм/мин., S = 4700 мин$^{-1}$. Время одного прохода составило 7 мин.

По показаниям динамометра, в программе Microsoft Excel, строились графики изменения сил резания в зависимости от времени обработки, при этом измерение силы P_y не проводилось.

На участке графика (рис. 4) от 0 до 4 мин. 30 с. (участок СТЕНКА), максимальные значения составляющих сил резания P_Z = 22…24 Н; P_X = 19…21 Н.

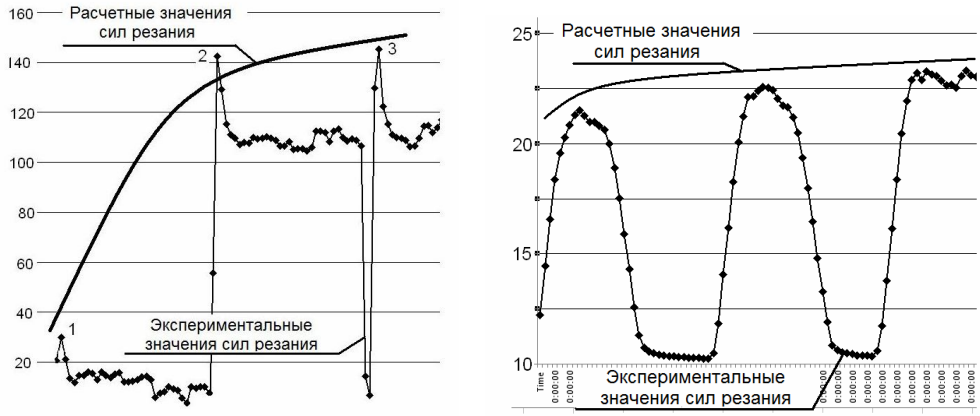


Рис.4. Изменение сил резания при обработке СТЕНКИ (слева) и при обработке ДНА

При врезании инструмента в ранее необработанную зону – 4 мин. 31 с., силы резания резко увеличились – максимальные значения P_Z = 145…150 Н; P_X = 135…140 Н.

На рис.4 показаны изменения сил резания при обработке ранее необработанной зоны. В точке 1 фреза находится на участке СТЕНКА, в точке 2 инструмент врезается в ранее необработанную зону, в точках 3 и 4 инструмент продолжает врезание, приближаясь к максимальной глубине, по этой причине значения параметров сил резания в точках 2 -3- 4 увеличивается.

Во втором случае обработка производилась на переменных режимах, где подача менялась от S = 10 мм/мин до S = 1126 мм/мин, частота вращения шпинделя от n = 4700 мин$^{-1}$ до n = 6000 мин$^{-1}$.

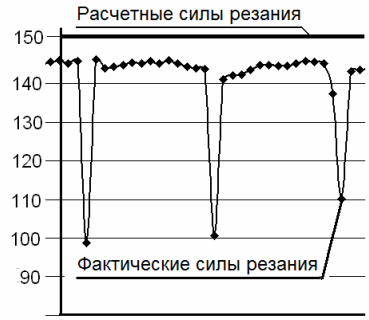


Рис.5. Изменение сил резания при врезании в ранее необработанную зону

Применение покадрового управления режимами резания позволило сократить время первого прохода в 7 раз. При этом силы резания в промежутке времени от 2 до 3 секунд (время врезания в ранее необработанную зону) (рис.5) и в промежутке от 50 до 51 секунд (время выхода фрезы из ранее необработанной зоны) (рис.5), существенно не изменяются. Максимальные параметры усилий резания находились в приделах от 140 Н до 145 Н.

Сравнение графиков зависимости усилий резания при традиционном методе обработки (при постоянных режимах резания), от времени обработки, с методом покадрового регулирования, показывает:

– предлагаемый метод обеспечивает более постоянные силовые параметры процесса резания;

– повышается производительность объемного фрезерования цилиндрическими фрезами со сферическим торцом вогнутых поверхностей сложной формы.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований были разработаны управляющие программы для обработки детали «МАТРИЦА» (рис.6, поверхность 2).

Обрабатываемую поверхность необходимо выполнить по 7 квалитету точности. Предварительная обработка вогнутой сопрягаемой поверхности R12,07 x R50,3 x R27,66 x R50,3 x R12,07, производилась цилиндрической фрезой фирмы HANITA D = 10 мм.

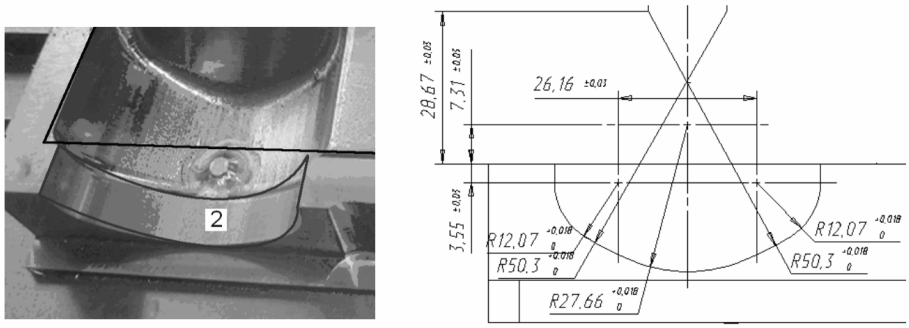


Рис.6. Общий вид матрицы и эскиз обрабатываемой поверхности

Предварительный припуск $T_{ст.}$= 0,25 мм, припуск ранее необработанной зоны $T_{дно.}$ = 0,72 мм. Твердость $HRC_Э$ 40…45.

Окончательная обработка производилась фрезой фирмы HANITA D = 10мм со сферическим торцом R = 5 мм.

По техническому заданию необходимо было изготовить две матрицы, поэтому были опробованы два метода обработки, в первом случае, сопрягаемая поверхность обрабатывалась на постоянной подаче F = 10 мм/мин, частоте вращения шпинделя S = 4700 мин$^{-1}$, расстояние между проходами L= 0,1 мм, время обработки данной поверхности составило 576 мин.

Контроль точности обработанных вогнутых сопрягаемых поверхностей производился на координатно-измерительной машине DEA IOTA 1204. Сравнение заданных и фактических размеров показывает, что применение способа обработки по номинальной поверхности 3D модели без регулирования режимов резания, не позволяет достичь требований чертежа. Кроме того, выбор подачи по наиболее загруженному участку (ранее необработанная зона) существенно повышает время обработки.

Во втором случае, при обработке второй матрицы (зеркальное отображение первой) управляющая программа была разработана с расчетно-исполнительными блоками, позволяющими системе ЧПУ по меняющейся траектории инструмента, самостоятельно определять раннее необработанные зоны, устанавливая кинематические режимы резания на любом участке обрабатываемой поверхности, без применения дополнительных адаптивных систем.

Применение покадрового управления режимами резания сокращает время обработки до 48мин., то есть более чем в 10 раз.

Вывод. Анализ результатов исследований в условиях производства, при изготовлении поверхностей с жесткими геометрическими требованиями, показал, что время обработки существенно снизилось, при этом были выполнены требования конструкторской документации.

Литература

1. Батуев, В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском. дис. … канд. техн. наук / В.В. Батуев.- Челябинск: Южно-Уральский государственный университет. - 2007. - С. 85-86.

2. Малютин, Г.Е. Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ / Г.Е. Малютин// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. - №4(306). - С.74-81

3. Козлов А.М. Математическое моделирование устойчивости динамической системы фрезерного станка на основе определения податливости зоны резания / А.М. Козлов А.М., Е.В. Кирющенко // Вести вузов Черноземья.- 2012. - № 2. - С. 39 – 42

4. Козлов, А.М. Расчет коэффициента усадки стружки при чистовой обработке сферическими фрезами / А.М. Козлов, Г.Е. Малютин // Материалы III международной научно-практической конференции «21 век: фундаментальная наука и технологии». - Москва. 2014. - С. 89-94

5. A M Kozlov, E V Kiryuschenko, A V Khandozhko The study of oscillations excitation patterns in the process of milling with portable equipment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012136 doi:10.1088/1757-899X/177/1/012136

Improvement of fine milling of concave surfaces on cnc machines

Malyutin G.E.

Lipetsk State Technical University. 30 Moskovskaya St., Lipetsk, Russia
malgena@rambler.ru

Keywords: 3D milling, unprocessed zones, productivity

The article deals with the problem of increasing the productivity of the final three-dimensional milling of zones left unprocessed after semi-finished milling. The use of adaptive devices on imported machines - UNOVA (USA), YAMAZAKI MAZAK (Japan) - made it possible to manage the processing modes, but the cost of this option is 20-30% of the equipment cost and their application for volume milling is limited, as these devices respond to changes in the cutting zone with some delay. Modern CNC systems make it possible not only to read information, but also to perform mathematical calculations (trigonometric, logarithmic, logical), and if the calculation and execution commands for determining the geometry of the cutting zone are introduced into the control program, it is possible to control the cutting process without using additional devices .

УДК 621.791.722

Влияние прихваток, выполненных ручной аргоновой сваркой, и отклонения электронного пучка при электронно-лучевой сварке относительно свариваемого стыка на качество продольного шва обечайки ракеты-носителя

Якубович И.О.[1a], Муниров Д.В.[1], Шеллер В.В.[1]

[1]АО «Красноярский машиностроительный завод»
Российская федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29
[a]flyersin@mail.ru

Ключевые слова: Электронно-лучевая сварка; сварной шов; прихватка; разделка кромок; электрический пучок

Данная статья показывает результаты проведенных исследований в области машиностроения, направленных на влияние прихваток, выполненных ручной аргонодуговой сваркой, и смещения электронного пучка на качество сварного шва на образце обечайки ракеты-носителя. Ввиду стесненных условий вакуумной камеры, сборка под сварку производилась с выполнением прихваток ручной аргонодуговой сваркой с внешней и внутренней сторон свариваемых пластин. Для испытания было применено три вида прихваток. Смещение центра пучка относительно свариваемого стыка минимально на второй части шва, а участки 1, 2, 3, 4 варились со смещением центра электронного пучка от центра стыка на ≈1 мм и 2 мм соответственно. Проведенные исследования с применением УЗК и РК, а также испытания на отдельных образцах показывают, какой из использованных методов оказал большее влияние на качество шва.

Введение. В настоящее время для выполнения продольных швов обечаек ракетносителей (РН), широко применяется электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Применение этой технологии обусловлено высокими требованиями конструкторской документации (КД) к качеству сварного соединения и к сборочной единице в целом (геометрии обечаек, прочностные характеристики и т.д.). ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединить за один проход металлы и сплавы толщиной 0,1…400 мм. При этом наиболее пер-

спективным является соединение изделий из тугоплавких металлов, из термически упрочненных материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций ряда ответственных крупногабаритных толстостенных и толстолистовых конструкций из сталей и легких сплавов [1-2].

Исследование. Целью данной работы является определение степени влияния прихваток, выполненных ручной аргонодуговой сваркой и незначительные отклонения электронного пятна от свариваемого стыка на качество выполнения продольного шва электронно-лучевой сваркой. Электронно-лучевая сварка выполняется на установках, состоящих из двух основных комплексов – энергетического и электромеханического. Энергетический комплекс предназначен для формирования пучка электронов с заданными параметрами, управления его мощностью и положением относительно свариваемого стыка. Выбор параметров энергетического комплекса определяется толщиной и теплофизическими характеристиками свариваемых материалов, а также требованиями к коэффициенту формы проплавления.

Электромеханический комплекс установки предназначен для герметизации и вакуумирования рабочего объема, выполнения всех сварочных, установочных и транспортных перемещений свариваемого изделия и электронно-лучевой пушки (ЭЛП), выполнения вспомогательных операций и управления всеми этими процессами [3].

В состав установки для электронно-лучевой сварки входит электронная пушка и блок питания. Преимуществами электронно-лучевой сварки являются:

- высокая концентрация теплоты, позволяющая за один проход сваривать металлы толщиной от 0,1 до 200 мм;
- для сварки требуется в 10…15 раз меньше энергии, чем для дуговой сварки;
- отсутствует насыщение расплавленного металла газами.

К недостаткам электронно-лучевой сварки можно отнести образование непроваров и полостей в корне шва, а также необходимость создания вакуума в рабочей камере [4].

Для исследования влияния прихваток и незначительного отклонения от свариваемого стыка электронного пучка при сварке продольного шва обечаек, было проведено испытание по сборке и сварке технологического образца-имитатора продольного шва. Образец-имитатор продольного шва изготавливался из двух пластин сплава АМг6НВП длиной 2200 мм, шириной 200 мм, и толщиной 12 мм. Сварное соединение по ОСТ 92-1021-81-С2-ЭЛ. Сварка образца-имитатора проводилась с использованием приспособления для сборки-сварки и механической обработки, и установки для ЭЛС, укомплектованной источником питания, обеспечивающим генерацию электронного пучка не менее 15 кВт.

Электронно-лучевое воздействие в диапазоне 10^5…10^6 Вт/см^2 характеризуется феноменом «кинжального», или глубокого проплавления, с соотношением глубины шва к его ширине 10:1 и более. Увеличение концентрации энергии до ~10^7 Вт/с м^2 приводит к переходу от «кинжального» проплавления к образованию отверстия в материале. Нагрев при концентрации менее 10^5 Вт/см^2 сопровождается обычной полусферической формой проплавления металла [5].

Подготовка свариваемых кромок под сварку выполнялась на специальном приспособлении в соответствии с ОСТ 92-1152-75, что включает в себя обезжиривание и зачистку поверхности шабером. Ввиду стесненных условий вакуумной камеры сборка под сварку производилась с выполнением прихваток ручной аргонодуговой сваркой с внешней и внутренней сторон свариваемых пластин. Для испытания было применено три вида прихваток (рис.1):

- Прихватка с внешней стороны пластин без разделки кромок;
- Прихватка с внешней стороны пластин с разделкой кромок 5х45˚;
- Прихватка с внутренней стороны пластин без разделки кромок.

Выполнение сварного соединения ЭЛС производилась на следующих режимах:

- Iсв = 150÷160 мА. (ток сварки);
- Iкл=15÷20 мА. (ток коллектора);

– Iф= +1,5 мА. (ток расфокусировки);
– Vсв=30 м/ч. (скорость сварки).

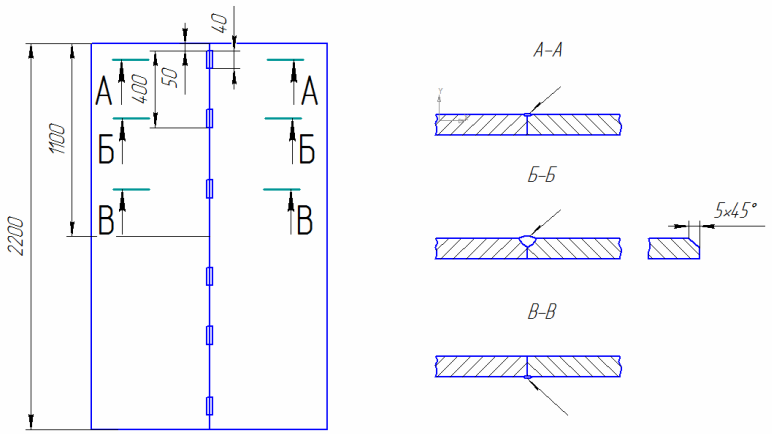


Рис.1. Расположение прихваток на сварном соединении

При этом на участках сварного шва 5÷9 смещение центра пучка относительно свариваемого стыка минимально, а участок 1, 2 варился со смещением центра луча от центра стыка на ≈ 1 мм, а участок 3, 4 сваривался со смещением центра луча от центра стыка на ≈2 мм. Результаты представлены на рис. 2.

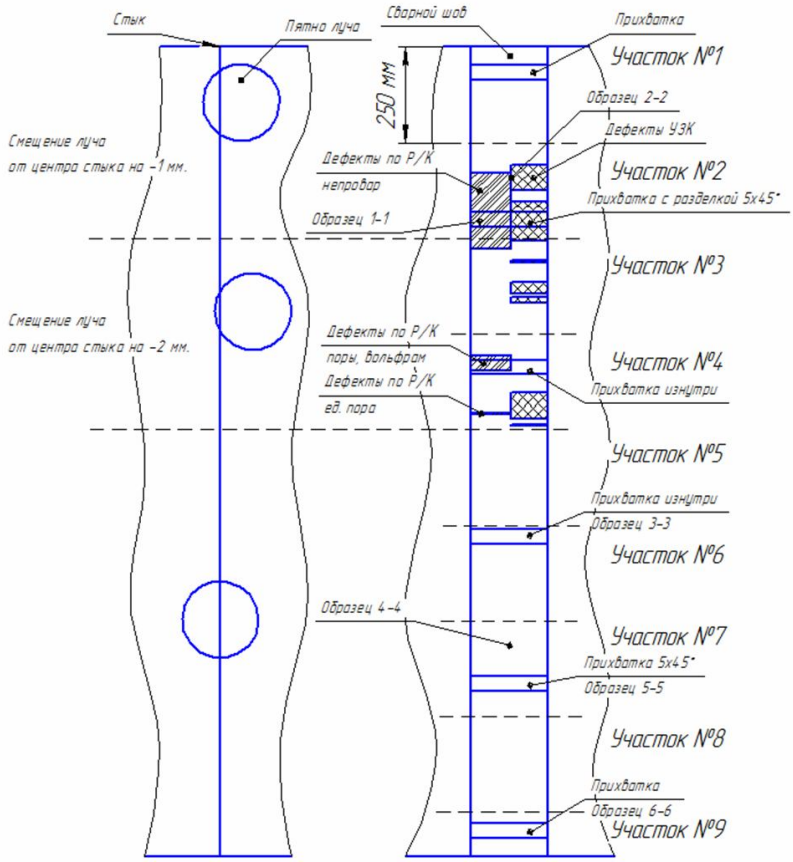


Рис. 2. Изображение результатов проверки качества сварного шва ультразвуковым и радиографическим контролем

Для проверки качества сварного шва были применены следующие методы:

– внешний осмотр, включающий в себя контроль занижения сварного шва на 2÷3 мм и ширины сварного шва на 4,5…5 мм;

– Ультразвуковой контроль, с помощью которого были выявлены протяженные дефекты на участках: №2 (62;75), (170;90), №3 (0,15), (128,30), (165;15), №4 (160;75) (где 1-ое

число – это координата начала дефекта относительно начала контролируемого участка, а 2-ое число – протяженность дефекта);

– Радиографический контроль сварного шва, на рентгенограмме которого были выявлены протяженные дефекты на участках №2 l = 180 мм, №3 l = 30 мм, №4 l = 40 мм.

Дополнительно были вырезаны образцы сварного шва для проведения металлографического исследования и механических испытаний. Образцы были взяты из мест:

– С прихваткой + непроваром, образец 1-1;
– С непроваром без прихватки, образец 2-2;
– С прихваткой изнутри без разделки, образец 3-3;
– Без прихватки, образец 4-4;
– С прихваткой с разделкой 5х45˚ с внешней стороны, образец 5-5;
– С прихваткой без разделки с внешней стороны, образец 6-6.

По результатам исследований дефектов сварки в виде пор, окислых плен и неметаллических включений не было обнаружено. Результаты испытаний образца 1-1: $\sigma_{вр} = 34{,}3\ кгс/мм^2$, образца 2-2 – $\sigma_{вр} = 34{,}5\ кгс/мм^2$, образца 3-3 – $\sigma_{вр} = 33{,}5\ кгс/мм^2$, образца 4-4 – $\sigma_{вр} = 34{,}4\ кгс/мм^2$, что соответствует требованиям КД.

Вывод. Применение технологических прихваток при сборке свариваемого стыка на качество сварного шва оказывает незначительное влияние. Наибольшее негативное влияние на качество сварного соединения оказало смещение пятна луча относительно оси стыка при сварке, что было подтверждено результатами УЗК и Р/К на участках 1÷4, тогда как на участках 5÷9 технология сборки-сварки обеспечивает прочность и качество сварного соединения заданным требованиям КД.

Литература:

1. Е.Л. Мамутов. Электронно-лучевая сварка деталей большой толщины, 1992, 232с.
2. Электронно-лучевая технология/З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. // М.: Энергия, 1980, 528с.
3. Б.Е. Патон. Оборудование для сварки, 1999, 496с.
4. Основы электронно-лучевой обработки материалов/Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов // Библиотека технолога, 1978, 241с.
5. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, Е.И. Истомин, В.Е. Локшин // 1985, 125с.

Influence of tack welding, executed by manual argon welding, and aberrations of the electronic bundle at electron beam welding concerning the welded junction on quality of the direct weld of the shell of the carrier rocket

Yakubovich I.O.[1a], Munirov D.V.[1], Sheller V.V.[1]

[1]JSC “Krasnoyark machine-building”
29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[a]flyersin@mail.ru

Keywords: Electron-beam welding; weld seam; tack; edge cutting; beam

This article shows results of the spent researches in the field of the engineering industry, aimed at the effect of welds by argon-arc welding and beam bias on the quality of the welded seam on the sample of the rocket carrier shell. Because of the constrained conditions of a vacuum chamber fit-up, we made with tacks by manual argon welding from the external and internal parties of welded plates. To test it has been applied three aspects tacks. Displacement of a vertex of a pencil concerning a welded joint minimum on the second part of a seam, and sections 1, 2, 3, 4 are with displacement of the centre of a beam from the centre of a joint on ≈1 mm and 2 mm accordingly. The conducted researches with application Ultrasonic control and radio graphical control and for separate samples tests show what of the used methods rendered a greater influence on quality of a seam.

УДК 621.9.06; 621.9.04; 621.91; 621.92; 621.7.029; 621.785.5

Установление эксплуатационных нагрузок привода гибридных металлообрабатывающих станков [5]

Скиба В.Ю.[a], Хлебова И.В., Скиба П.Ю., Рубцова Н.С.

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия
[a]skeeba_vadim@mail.ru

Ключевые слова: эксплуатационные нагрузки, гибридные станки, прогнозирование, технические характеристики, нормальный закон распределения

В работе дается описание одного из вариантов решения задачи моделирования распределения эксплуатационных характеристик гибридных станков. Представленный метод, основанный на использовании математического аппарата теории вероятности и математической статистики, закладывает возможность использования систем автоматического проектирования на начальной стадии разработки общей концепции нового технологического оборудования. Описанный способ решения обозначенной проблемы не противоречит общепринятым подходам и достаточно хорошо согласуется с апробированными методиками расчета различных конструктивных элементов приводов интегральных станочных комплексов на усталостную прочность (выносливость). Установлено, что математическая модель определения эквивалентных нагрузок не требует дополнительных исходных данных, кроме тех, которые могут быть получены на предшествующих этапах проектирование. Использование предложенной методики способствует формированию объективной информации о расчетных нагрузках гибридного металлообрабатывающего оборудования, что дает возможность гарантированно обеспечить требуемый уровень надежности вновь разрабатываемого не имеющих аналогов станочного парка.

Введение. Основным направлением развития современного машиностроения является обеспечение выпуска конкурентоспособной и качественной продукции. В связи с этим в станкостроении отчетливо наблюдается тенденция к разработке инновационного типа технологического оборудования – гибридных (комплексированных) металлообрабатывающих комплексов [1–12]. Объединение различных по своей природе технологических процессов в одном станке: абразивное шлифование – поверхностная закалка, лазерная поверхностная закалка в сочетании с механической обработкой, резание – закалка, точение – закалка - шлифование, обусловлено стремлением разработчиков к расширению технологических возможностей станков и обеспечение их автономной работы в гибком машиностроительном производстве [13–20]. Данный прием позволяет не только достигнуть высоких показателей ресурсо- и энергосбережения, но и обеспечить соответствующий уровень производительности обработки и качества детали [21–30].

Объектом данных исследований является начальный этап проектирования гибридного технологического оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую обработки.

Большая часть деталей приводов гибридных металлообрабатывающих станков осуществляют свою работу в условиях длительного нагружения при циклическом воздействии. Как известно, одной из главных причин выхода из строя конструктивных элементов, эксплуатируемых в таком режиме, является разрушение материала при напряжениях, уровень которых значительно меньше предела прочности при статическом нагружении. Следовательно, про-

[5] Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_17.

блема рационального выбора эксплуатационных нагрузок при расчете подобных деталей на усталостную прочность является основополагающей для повышения надежности привода.

Общепринятый подход к решению обозначенной проблемы базируется на использовании в конструкторских расчетах функциональных зависимостей распределения времени функционирования привода при различных сочетаниях частот вращения и действующих крутящих моментов, данные о которых получают на базе информации об условиях эксплуатации станков-аналогов. Однако особенность расчетов комплектующих привода станков на первоначальном этапе проектирования заключается в использовании и учете эквивалентных нагрузок, а не эквивалентных напряжений, поскольку определенное конструктивное исполнение узлов и их деталей, как правило, еще не известно.

При создании же принципиально новой конструкции интегрального станка, когда аналоги либо отсутствуют, либо только в первом приближении соответствуют вновь разрабатываемому оборудованию, задача существенно усложняется. Связать это можно только с тем, что эксплуатационные нагрузки многоцелевого металлообрабатывающего оборудования представляют собой систему коррелированных случайных величин, зависящих от многочисленных и разнообразных факторов, сочетания которых многовариантны и носят вероятностный характер [31]. Более того, требуется определенный прогноз условий эксплуатации проектируемого станка задолго до их проверки на практике. Поскольку, на стадии разработки технического предложения достоверная информация чаще всего отсутствует, а вопрос обоснованного назначения рациональных (оптимальных) эксплуатационных нагрузок на данный момент не решен, то основным инструментом при поиске данных факторов является использование стандартных методик и рекомендаций, как показывает практика, приводящих к завышенной металлоемкости технологического оборудования.

Цель работы: разработка методики математического моделирования распределения эксплуатационных характеристик.

Теория. Эффективная мощность (P [кВт]), частота вращения (n [мин$^{-1}$]) и крутящий момент (Т [Н м]) на шпинделе – это те главные эксплуатационные характеристики технологического оборудования, которые образуют систему взаимосвязанных случайных величин, зависящих от большого числа аддитивно и мультипликативно действующих факторов (параметров технологических операций). Исходя из этого, в основу математической модели, адекватно отражающей специфику условий функционирования гибридного металлообрабатывающего оборудования [32, 33], целесообразно положить принцип суперпозиции. В соответствии с ним дифференциальная функция распределения для системы эксплуатационных характеристик имеет вид:

$$f(x,y)=\sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q(x,y), \qquad (1)$$

где $f_q(x,y)$ - дифференциальная функция элементарных (частных) распределений эксплуатационных характеристик $\boldsymbol{x}$ и $\boldsymbol{y}$ (соответственно T и n) для некоторых (q - x) условий обработки (мощность P в число аргументов этой функции не входит, так как является производной от n и T); p_q - вероятность работы интегрального станочного комплекса в этих условиях; ω - число разных условий обработки, реализуемых на станке.

Статистическими исследованиями установлено, что при определенных сочетаниях технологических факторов для некоторых условий обработки, рассматриваемые эксплуатационные характеристики можно описать логарифмически нормальным законом распределения. В связи с этим произведем в формуле (1) замену переменных: $x=\ln T$; $y=\ln n$, после чего функцию *f(x, y)* можно представить в виде поверхности распределения (рис. 1). Всю начальную информацию, необходимую для ее создания, можно получить на этапе прогнозирования технических характеристик технологического оборудования [31–33] или взять из технического задания на его проектирование.

В свою очередь, для исследования нагрузок, которые будут действовать на отдельные элементы привода, вместо поверхности более целесообразно использовать картину распре-

деления эксплуатационных характеристик, представляющая собой семейство линий равной вероятности (кривых равной плотности) (рис. 2). Данная картина формируется путем сечения поверхности *f(x, y)* рядом плоскостей, параллельных горизонтальной плоскости, и проецирования полученных кривых на эту плоскость [31-33, 34].

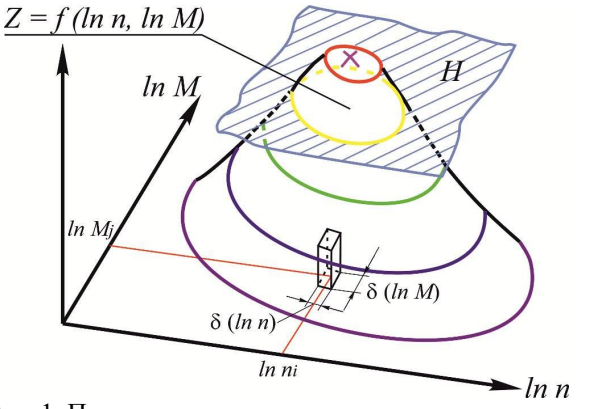


Рис. 1. Поверхность распределения системы эксплуа

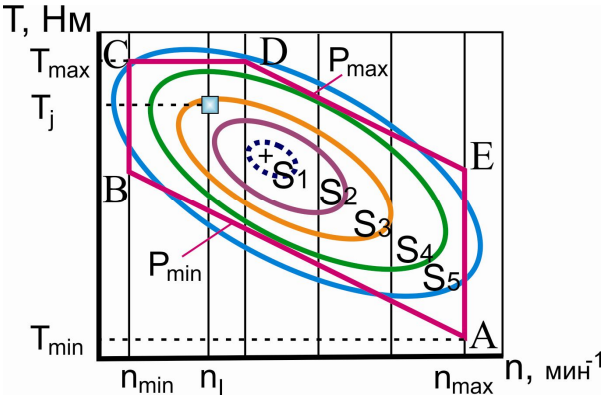


Рис. 2. Картина распределения системы эксплуатационных характеристик станка

Непрерывно интегрируя функцию *f(x, y)* внутри некоторой области *S*, ограниченной рамками *ABCDE* значений характеристик (рис. 2), можно найти вероятности p_{ij} условий работы станка для всех сочетаний n_i и T_j, а также соответствующей им мощности P_{ij}. При этом вероятность попадания точки с координатами $\boldsymbol{x}_i$ и $\boldsymbol{y}_i$ в элементарную область ΔS определяется следующим образом:

$$p_{ij}\left[(x,y)\subset\Delta S\right]=\iint\limits_{\Delta S} f(x,y)dxdy\,. \qquad (2)$$

Рассчитанные таким образом значения вероятностей реализации характеристик $\boldsymbol{n}_i$ и $\boldsymbol{T}_j$ могут служить в дальнейшем для вычисления эквивалентной нагрузки, действующей на любой вновь разрабатываемый конструктивный элемент привода.

Результаты и обсуждение. Реализацию предлагаемой методики рассмотрим на примере привода главного движения гибридного металлообрабатывающего оборудования. Последовательность проведения моделирования следующая: 1) для практической ценности анализа выделенную на схеме область *S* разбивают на ряд подобластей (зон) S_k , число которых в общем случае должно быть на единицу больше числа ступеней частоты вращения привода (в примере $k = 5$; см. рис. 2).

В пределах заданных ограничений каждой из зон последовательно осуществляют поиск всего множества возможных сочетаний значений n_i и T_j: $n_i \in \{n_{\min}, n_{\max}\}$; $T_j \in \{T_{\min}, T_{\max}\}$. Для каждой комбинации этих ограничений вычисляют значение требуемой мощности P_{ij} и верифицируют возможность ее исполнения на проектируемом станочном комплексе. Если значение P_{ij} оказывается в интервале от $P_{\min}$ до $P_{\max}$ (рис. 2), то по функциональной зависимости (2) определяют вероятность данной комбинации условий для некоторой элементарной площадки ΔS. В тоже время осуществляют вычисления значения требуемого крутящего момента T_l и ожидаемого числа N_l циклов нагружения для любого *l*-го элемента привода:

$$T_l = T_j/(u_l\eta_l);\ \ N_l = 60 n_i u_l p_{ij}\tau\,,$$

где u_l и η_l - передаточное число и коэффициент полезного действия кинематической (КПД) цепи привода от *l*-го элемента до шпинделя; τ - технический ресурс привода, ч. КПД привода главного движения гибридного станочного комплекса определяют по методике [35], предусматривающей разделение потерь энергии на постоянные и переменные составляющие. Технический ресурс привода устанавливает, как правило, заказчик в техническом задании на проектирование станка.

Описанный алгоритм повторяется в цикле последовательно по мере возрастания номера зоны до тех пор, пока не будут исследованы все зоны, которые функционально обеспе-

чиваются конкретным элементом привода. Полученные в результате вычислений значения T_l и N_l используют для определения необходимой эквивалентной нагрузки $T_{экв}$ согласно методики [36]:

$$T_{экв} = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0}\sum_{l=1}^{K} T_l^m N_l} ,$$

где N_0 и m - соответственно базовое число циклов нагружения и показатель наклона нисходящей ветви кривой усталости [37, 38], зависящие от конструктивных особенностей проектируемого конструктивного элемента привода и физико-механических свойств материала, из которого он изготовлен; K – число рассматриваемых конструктивных элементов привода.

Выводы. Представленный способ решения обозначенной задачи достаточно хорошо согласуется с апробированными методиками расчета различных конструктивных элементов приводов комплексированных станочных комплексов на усталостную прочность (выносливость). Математическая модель определения эквивалентных нагрузок не требует дополнительных исходных данных, помимо тех, которые могут быть получены на предшествующих этапах конструирования. Более того, использование предложенной методики способствует формированию объективных данных о расчетных нагрузках гибридного станочного металлообрабатывающего оборудования, что, в свою очередь, дает возможность обеспечить требуемый уровень надежности вновь разрабатываемых не имеющих аналогов станков.

Литература

1. Янюшкин, А.С., Сафонов С.О., Лобанов Д.В. и др. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств. Братск: Изд-во БрГУ, 2006. 302 с.
2. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедрения // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2011. № 6 (64). С. 20–23.
3. Архипов П.В., Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки // Вестник Таджикского технического университета. 2013. Т. 2, № 2. С. 32-37.
4. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 2. С. 156-157.
5. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 95 -98.
6. Skeeba V.Yu. Actual Problems and Decisions in Machine Building. Pfaffikon: Trans Tech Publ. 2015. 344 p.
7. Станочное оборудование, основанное на комплексировании нескольких технологических операций / В.Н. Пушнин, И.А. Ерохин, Д. Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 245–255.
8. Абрамсон С.И. Повышение производительности металлорежущих станков при применении групповых методов обработки. М.: НИИмаш, 1981. 56 с.
9. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков. Л.: Машиностроение, 1990. 247 с.
10. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008. Vol. 57, iss. 2. P. 736–749. – doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
11. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. Vol. 42, iss. 1. P. 433–436. – doi: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
12. Скиба В.Ю. Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов первой международной научно-практической конференции // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. 2014. № 11 (66). С. 83.
13. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives / Z. Zhu, V.G. Dhokia, A. Nassehi, S.T. Newman // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2013. Vol. 26, iss. 7. P. 596–615. – doi: 10.1080/0951192X.2012.749530.
14. Thermal Simulation of Laser-assisted Turning / J.I. Arrizubieta, F. Klocke, S. Gräfe, K. Arntz, A. Lamikiz // Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. P. 639–646.
15. Laser assisted turning of titanium metal matrix composite / R. Bejjani, B. Shi, H. Attia, M. Balazinski // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60. P. 61–64. – doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.086.
16. Скиба В.Ю. Повышение эффективности технологического процесса обработки деталей машин, при интеграции абразивного шлифования и поверхностной закалки ТВЧ: дис. … канд. техн. наук: 05.03.01 / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2008. 257 с.

17. Hybrid machining of Inconel 718 / Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, J. Fan, S. Lei, Y.C. Shin, G. Petrescu // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. Vol. 43. P. 1391–1396.

18. Разработка технологической установки для плазменно-механической обработки / П.В. Трегубчак, Д.Ю. Корнев, В.Н. Пушнин, В.Ю. Скиба // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 135-141.

19. Nagae A. Development trend of multi-tasking machines // Proceedings of the 11th International Conference on Machine Tool Engineers, Tokyo, Japan, 3–5 November 2004. Tokyo, 2004. P. 312–323.

20. Иванцивский В.В., Скиба В.Ю. Повышение поверхностной микротвердости стали при интеграции поверхностно-термической и финишной механической обработок // Научный вестник НГТУ. 2006. № 3. С. 187–192.

21. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeeba, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. - P. 1408–1411. – doi: 10.1080/10426914.2014.973595.

22. Технологические особенности формирования параметров качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Ю. Скиба, В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, К.А. Парц // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 3 (68). С. 31–41.

23. Integrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "Diamond Smoothing" / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. Skeeba // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 125. P. 012031. – doi: 10.1088/1757-899X/125/1/012031.

24. Hybrid processing: the impact of mechanical and surface thermal treatment integration onto the machine parts quality / V.Yu. Skeeba, V.V. Ivancivsky, A.V. Kutyshkin, K.A. Parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 126. P. 012016. – doi: 10.1088/1757-899X/126/1/012016.

25. Гибридная обработка: интеграция поверхносто-термической и финишной механической операций на одном технологическом оборудовании / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцивский, П.Ю. Скиба, Ю.М. Анваров // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4 (55). С. 111-115.

26. Структура износостойких плазменных покрытий после высокоэнергетического воздействия ТВЧ / Ю.С. Чёсов, Е.А. Зверев, В.В. Иванцивский, В.Ю. Скиба, Н.В. Плотникова, Д.В. Лобанов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 4 (65). С. 11-18.

27. Skeeba V., Pushnin V., Kornev D. Quality improvement of wear-resistant coatings in plasma spraying integrated with high-energy heating by high frequency currents // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 788. P. 88-94.

28. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / E.A. Zverev, V.Yu. Skeeba, N.V. Martyushev, P.Yu. Skeeba // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. P. 132-137.

29. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeeba // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. P. 81-85.

30. Обеспечение качества поверхностного слоя при алмазном выглаживании в условиях интегрированной обработки / В.Н. Пушнин, Н.В. Вахрушев, П.В. Трегубчак, Д.Ю. Корнев, В.Ю. Скиба // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 169-176.

31. Прогнозирование технических характеристик интегрального технологического оборудования / В.Н. Пушнин, Д.Ю. Корнев, Н.В. Вахрушев, В.Ю. Скиба, К.А. Парц // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 97-101.

32. Птицын С.В., Чёсов Ю.С. Методология прогнозирования технических характеристик металлорежущих станков // Известия вузов. Машиностроение. 2000. №1-2. С. 90-96.

33. Прогностика технических характеристик металлообрабатывающего оборудования / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцивский, И.В. Хлебова, П.Ю. Скиба // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 1-4 (55). С. 115-120.

34. Птицын С.В., Чёсов Ю.С. Параметрическая оптимизация качества станочного оборудования // СТИН. 2002. № 6. С. 19-23.

35. Соколов. Н.Г., Елисеев В.А. Расчеты по автоматизированному электроприводу металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1970. 296 с.

36. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

37. Когаев В.Н., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

38. Evgrafov A.N. Advances in Mechanical Engineering: Selected Contributions from the Conference “Modern Engineering: Science and Education”. Springer Int. Publ., 2013. 141 p.

Operational load determination of the hybrid metal-working machinery transmission

Skeeba V.Yu.[a], Khlebova I.V., Skeeba P.Yu., Rubtsova N.S.

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]skeeba_vadim@mail.ru

Keywords: operational loads, hybrid machines, prediction, technical specifications, normal distribution law

The research describes one of the options for modeling the distribution of hybrid machines performance characteristics. We present the method based on the use of the mathematical apparatus of probability theory and mathematical statistics which makes it possible to use automatic design systems at the initial stage of developing a common concept of new technological equipment. The way in which this problem is addressed does not contradict the generally accepted approaches and is well suited to the proven methods of calculating the various design elements of the integrated machining units to fatigue resistance (endurance). It has been established that the mathematical model for the determination of equivalent loads does not require additional source data except those that may be obtained in the prior stages of design. The use of the proposed methodology contributes to the development of objective information on the estimated loads of hybrid metal equipment, which ensures that the required level of reliability of the newly developed unparalleled machine tool population can be guaranteed.

Funding: This study was supported by a NSTU grant (project No. ТП-ПТМ-1_17)

УДК 624.954

Гравитационное устройство для выгрузки кускового материала из бункера

Коноплев В.И.[1,a], Анцев В.Ю.[1,a], Воробьев А.В.[1,a], Мельников Е.С.[1,a]

[1]Тульский государственный университет, пр. Ленина, 92, г. Тула, 300012, Россия
[a] ptm@tsu.tula.ru

Ключевые слова: гравитация, заклинивание, бункер, форсунка, сжатый воздух, ступень, диафрагма

Рассмотрено устройство бункера, позволяющее проводить выгрузку кускового материала, предрасположенного к заклиниванию в замкнутом объеме при нарушении условий гравитационного истечения. Условия гравитационного истечения материала изменяются при работе из-за налипания на дно бункера мелких влажных частиц, что приводит к увеличению коэффициента трения и зависанию кусков материала при его непрерывном потоке. Восстановление условий гравитационного истечения осуществляется ворошением кускового материала с помощью исполнительного органа и осушением дна бункера сжатым воздухом. Исполнительный орган выполнен в виде ступеней из плит, которые связаны между собой попарно диафрагмами с пазами для форсунок. Плиты закреплены с внутренней стороны бункера к вертикальным стенкам и расположены под углом 60° к горизонтали. Форсунки изготовлены в виде короба трапециевидного сечения и установлены с внешней стороны бункера в стенке и пазах диафрагм. Форсунки закреплены шарнирно, что позволяет регулировать их угол наклона относительно исполнительного органа.

В технологическом процессе производства кусковых материалов, например, щебня широко используются гравитационные устройства, в которых грузы движутся по наклонной плоскости под действием силы тяжести.

Если груз массой m скользит с коэффициентом трения f на длине l по наклонной плоскости под углом β, разность уровней в начальной и конечной точках $h = l\sin\beta$ и ско-

рость в этих точках $\upsilon_н$ и $\upsilon_к$, то работа силы тяжести груза, которая затрачивается на работу трения и приращение кинетической энергии [1], равна:

$$mgh = mgfl\cos\beta + m\frac{\upsilon_к^2 - \upsilon_н^2}{2}.$$

Угол β, под которым должна быть расположена наклонная плоскость при заданных скоростях в начальной $\upsilon_н$ и конечной $\upsilon_к$ точках и разности уровней между ними h, находится из равенства

$$\operatorname{tg}\beta = 2gh\frac{f}{2gh + \upsilon_н^2 - \upsilon_к^2}.$$

Конечная скорость при известной начальной скорости и заданном угле наклона β может быть определена по формуле

$$\upsilon_к = \sqrt{2gh(1 - f\operatorname{ctg}\beta) + \upsilon_н^2}.$$

При $\upsilon_к = \upsilon_н$, т. е. при движении с постоянной скоростью, $\operatorname{tg}\beta_0 = f$. Для замедленного движения $(\upsilon_к < \upsilon_н)\ \beta < \beta_0$, для ускоренного движения $(\upsilon_к > \upsilon_н)\ \beta > \beta_0$.

Условия гравитационного истечения материала изменяются при работе из-за налипания на дно бункера мелких влажных частиц, что приводит к увеличению коэффициента трения и, как правило, к зависанию кусков материала при его непрерывном потоке в замкнутом объеме. Вопросу восстановления условий гравитационного истечения материала посвящен ряд работ [2 – 6].

В статье предлагается устройство для выгрузки кусковых материалов из бункера, обеспечивающее восстановление условий гравитационного истечения материала [7].

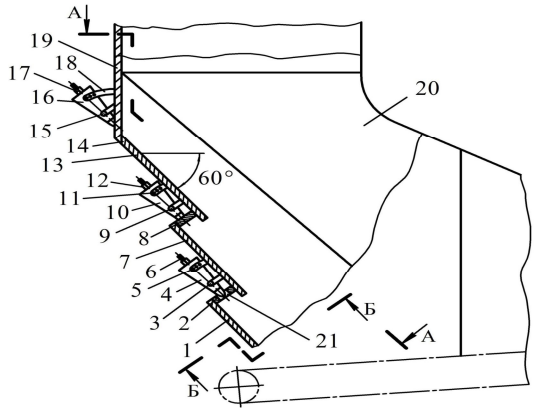


Рис.1. Гравитационное устройство для выгрузки кускового материала из бункера (общий вид)

Устройство для выгрузки кускового материала из бункера включает исполнительный орган 14 (рис. 1) и форсунки 4, 10, 16 (рис. 2, *а*) с наконечниками 6, 12, 17 для подвода сжатого воздуха. Исполнительный орган 14 изготовлен в виде ступеней 1, 7, 13, которые связаны между собой попарно диафрагмами 2, 8 с выполненными в них пазами 21.

Ступени 1, 7, 13 (рис. 2, *б*) исполнительного органа 14 изготовлены в виде плит, расположенных под углом 60° к горизонтали и закрепленных с внутренней стороны бункера 20 к вертикальным стенкам 22, 23. Концы ступеней 7, 13 по отношению к диафрагмам 2, 8 расположены консольно. С помощью кулис 18 и шарниров 15 на внешней стороне торцевой стенки 19 бункера 20 закреплена форсунка 16, а с помощью кулис 5, 11 и шарниров 3, 9 с внешней стороны к исполнительному органу 14 бункера 20 закреплены соответственно форсунки 4, 10. Форсунки 4, 10, 16 изготовлены в виде короба 24 (рис 2, *в*) трапециевидного сечения. Со стороны меньшего основания короба расположен по оси его симметрии золотник 25 и эластичная насадка 26 V-образной формы с продольным пазом 27.

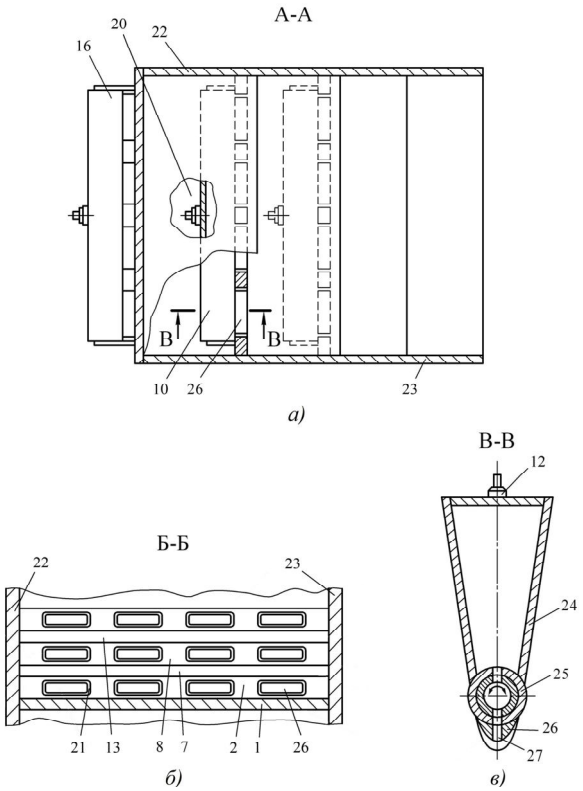


Рис.2. Гравитационное устройство для выгрузки кускового материала из бункера:
а – форсунки; *б* – ступени рабочего органа; *в* – короб

Гравитационное устройство для выгрузки кускового материала работает следующим образом. Пневматический привод включают при зависании кускового материала в бункере 20. В пазы 21 торцевой стенки 19 и диафрагм 2, 8 ставят эластичные насадки 26 форсунок 4, 10, 16. Вращением форсунок 4, 10, 16 относительно шарниров 3, 9, 15 регулируется их угол наклона относительно ступеней 1, 7, 13 и фиксируется кулисами 5, 11, 18. Ставится в положение открыто золотник 25. В короб 24 по наконечникам 6, 12, 17 подается сжатый воздух, который через золотник 25 и продольный паз 27 эластичной насадки 26 поступает в зазоры между кусковым материалом. Восстановление условий гравитационного истечения осуществляется ворошением кускового материала и осушением исполнительного органа 14.

Заклинивание материала нарушает бесперебойное функционирование бункера. Ручные операции по ликвидации зависания материалов в бункере малоэффективны и занимают много рабочего времени. Предлагаемое устройство обеспечивает эффективный процесс ворошения кускового материала, осушение исполнительного органа и восстановление условий гравитационного истечения кускового материала, что облегчает его выгрузку.

Литература:

1. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1983. 487 с.

2. Вибрационные интенсификаторы истечения сухих материалов из бункеров // Портал вибрационного оборудования ООО «Вибротехцентр-КТ» [Электронный ресурс] URL: http://www.vibrocom.ru/remarks/pva_rem.htm (дата обращения 30.03.2017).

3. Коноплев В.И., Анцев В.Ю., Реков П.К. Устройство для выгрузки кускового материала из бункера // Строительные и дорожные машины. 2015. № 1. С. 34-36.

4. Патент 2478553 РФ. Устройство для выгрузки кускового материала из бункера / В.И. Коноплев, В.И. Ануфриев, А.М. Аносов. Опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10.

5. Патент 2295400 РФ. Устройство для обрушения и рыхления слежавшихся сыпучих материалов в бункерах / В.Г. Ордин, С.Б. Ерошкин, Н.Я. Булатов, Л.Н. Канаплин. Опубл. 20.03.2007. Бюл. № 8.

6. Hiroaki Masuda, Ko Higashitani. Powder technology: Handling and operations, process instrumentation, and working hazards. CRC Press LLC. 2006. 394 p.

7. Патент 2342307 РФ. Устройство для выгрузки кускового материала из бункера / В.И. Коноплев, В.И. Ануфриев, С.В. Ануфриев. Опубл. 27.12.2008. Бюл. № 36.

The gravity device for removing lump material From the bunker

Konoplev V.I.[1,a], Antsev V.Yu.[1,a], Worobyov A.V.[1,a], Melnikov E.S.[1,a]

[1]Tula State University, 92 Prospect Lenina, Tula, 300012, Russian Federation
[a] ptm@tsu.tula.ru

Keywords: gravitation, jamming, bunker, nozzle, compressed air, step, diaphragm

The desing of the bunker, which capable to remove lumpy material, predisposed to jamming in a closed volume if the conditions of gravitational outflow are violated, is considered. Conditions of gravitational outflow of the material are changing during operation due to the sticking of small wet particles to the bunker bottom, which leads to an increasing of the friction coefficient and hanging of material pieces during their continuous flow. Restoring of the conditions of gravitational outflow is performed by shaking of lump material by the executive device and drying the bunker bottom with compressed air. The executive device is made in the shape of steps from the plates, which are connected together in pairs by diaphragms with slots for the nozzles. Plates are attached to vertical walls inside the bunker at an angle of 60° to the horizontal. The nozzles are made in the shape of a box of trapeziform section and are installed to wall and slots in the diaphragms outside the bunker. The nozzles are attached by hinge, which allows adjusting their tilt angle relative to the executive device.

УДК 621.01

Классификация деталей со сложнопрофильными поверхностями в технологической подготовке механообрабатывающих производств

Решетникова Е.П.[a], Бочкарёв П.Ю.[b]

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ул.Политехническая 77, г.Саратов, 410054, Россия
[a]purpose22@mail.ru, [b]bpy@sstu.ru

Ключевые слова: классификация сложнопрофильных деталей, высокоточные изделия, автоматизация проектирования, производственная система, разработка технологического процесса обработки, повышение качества проектных решений

В статье предложена классификация изделий со сложнопрофильными поверхностями с целью повышения качества проектных решений на этапе разработки технологического процесса их обработки. Проведенный анализ подходов к технологической подготовки производства и организации изготовления таких деталей показал несовершенство, как на этапе обработки, так и при технологической подготовке [1]. Одним из недостаточно проработанных вопросов при автоматизации процесса проектирования является способ контроля обрабатываемой сложной поверхности. Разработка системы классифицирования поверхностей детали для автоматического получения данных процесса измерения предполагает проведение анализа и предварительное классифицирование объектов производства. Несмотря на высокую сложность геометрии исследуемых деталей и различный характер возникающих при их обработке погрешностей, такие детали могут быть сгруппированы на основе общих признаков, типов обрабатываемых элементов и поверхностей, применяемых станков и способов решения возникающих проблем.

Неотъемлемой частью технологического проектирования производства изделий со сложнопрофильными поверхностями является процесс контроля получаемой поверхности детали. Разработка системы классификации поверхностей детали для автоматического получения данных процесса их измерения предполагает проведение анализа формы и взаимного расположения поверхностей объектов производства.

В технике наиболее распространенными являются три вида поверхности [5]:

- алгебраические, подчиненные математическим уравнениям, определенной формы и с определенным расположением в пространстве;
- поверхности, форма которых определена отдельными точками, а координаты этих точек заданы в виде чисел, обычно сведенных в таблицу, называемые поверхностями с числовыми отметками;
- конструктивные поверхности, форма которых определяется конструктивной необходимостью.

Особой трудоемкостью отличается изготовление деталей со сложными поверхностями таких, как детали летательных аппаратов и автомобилей, пресс-формы для получения деталей давлением, оснастка для литейного производства. Безграничному разнообразию деталей при автоматизированном проектировании необходимо противопоставить конечное число типов деталей для решения задачи – создания классификации деталей сложной геометрии с применением аппарата кластерного анализа [2] с целью:

– обеспечения процедуры рационального выбора и назначения контрольно-измерительного средства;

– определения способа сбора точек сложной поверхности (контактный/бесконтактный);

– определения методики оценки собранных данных, который обеспечит требуемое качество выполнения обработки деталей на протяжении реализации всего технологического процесса.

Следовательно, необходимо определить основные типы обрабатываемых деталей, провести целенаправленную смысловую обработку, на основе которой создать классификатор, интегрирующий данные о детали, формализовать ряд признаков, относящихся к описанию деталей, получаемых в конкретной производственной системе.

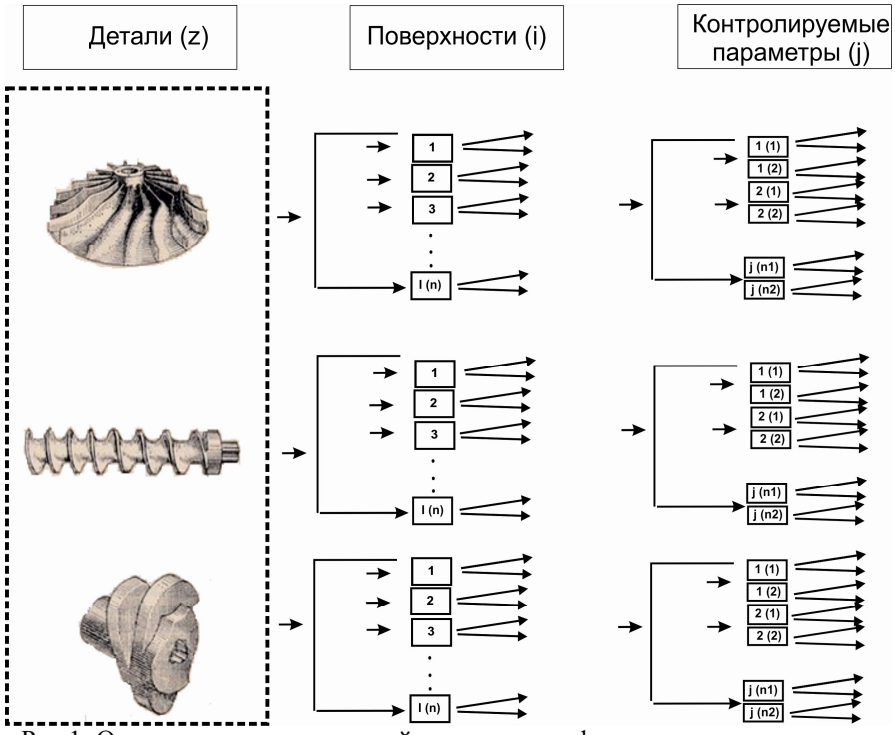


Рис.1. Оценка параметров деталей со сложнопрофильными поверхностями для контроля в реальной производственной системе

В рамках исследования оценка строится на основе информации о реальной производственной системе (рис.1):

– учет конкретной номенклатуры деталей, изготовленных в рассматриваемый период в данной производственной системе

– учет имеющихся средств контроля в данной производственной системе.

Для обеспечения автоматизации контроля параметров деталей со сложными поверхностями сформирована информационная база элементарных поверхностей [3], [8-9]. Предложено выделить 4 группы поверхности на детали:

1) элементарные поверхности (цилиндрические, конические, плоскость, сферические);

2) поверхности с периодическим профилем (винтовые, шлицевые, зубчатые);

3) поверхности, описываемые сложной функцией, и выполняющие специальное функциональное назначение (поверхности с аэродинамическими свойствами);

4) поверхности, описываемые кривыми более высокого порядка.

Для занесения информации в баз данных деталь разбивается на элементарные поверхности в соответствии с разрабатываемой классификацией [4].

Занесение данных о детали происходит в пять этапов:

- занесение общих сведений о детали;
- ввод данных об элементарных поверхностях составляющих деталь;
- занесение информации о требованиях к отклонениям от геометрической формы;
- ввод данных о размерных связях между элементарными поверхностями;
- занесение информации о требованиях к взаимному расположению элементарных поверхностей.

Таким образом, формируется таблица однородности поверхностей деталей на основе анализа, предъявляемых к ним размерным и геометрическим требованиям.

Таблица

Контролируемые параметры поверхностей деталей

Вид поверхности	Контролируемые размерные и геометрические параметры
Плоскость	Линейные размеры (а×в×h)
Цилиндрическая	Радиус основания (R)
	Размер боковой поверхности (h)
Коническая	Радиус основания (R)
	Угол для определения ориентации поверхности в пространстве
Сферическая	Радиус поверхности (R)
Тороидальная	Радиус наружной (образующей) в сечении поверхности (R)
	Радиус направляющей (R)
Винтовая	Угловой параметр
	Координаты образующей
	Шаг винтовой линии

Далее применяется аппарат кластерного анализа для определения критерия показателя степени сложности и возможности самого процесса контроля [6-7]**,** который сводится к нахождению количественного выражения коэффициента сложности с целью закрепления детали к определенной группе и соответственно выбор методики измерения поверхностей этой детали (количество контролируемых точек и их расположение на поверхности). Выбор методики измерения основан на сравнении полученного значения коэффициента сложности с базовым значением этого коэффициента для определенной группы.

Объединение поверхностей деталей в группы по однородности с позиции контролируемых параметров позволяет автоматизировать процесс контроля и обработки данных его результатов.

Предложено разделить объекты исследования на группы:

1- корпусные детали:

а) корпусные детали коробчатой формы в виде параллелепипеда, габариты которых имеют одинаковый порядок: *корпуса редукторов; корпуса коробок скоростей; корпуса коробок подачи;*

б) корпусные детали с гладкими внутренними цилиндрическими поверхностями, протяженность которых превышает их диаметр: *блоки цилиндров; двигатели; пневмо- и гидроаппаратура;*

в) корпусные детали сложной пространственной геометрической формы: *корпуса паровых, газовых турбин; центробежные насосы; вентили, краны; картер заднего моста;*

г) корпусные детали с направляющими поверхностями: *столы-спутники; суппорты; планшайбы;*

д) корпусные детали типа кронштейнов, угольников, стоек, крышек.

2- детали типа диск:

а) детали, выполняющие функции кинематических звеньев механических передач (*зубчатые колеса, звездочки, шкивы, муфты*);

б) детали, выполняющие роль статоров и роторов в машинах центробежного типа (*рабочие колеса и направляющие аппараты центробежных насосов, статор турбобура*);

в) детали, выполняющие роль регулирующих, прижимных и опорных элементов, определяющих положение других деталей в машинах (*крышки, диски, пяты, прижимные диски*).

3- детали типа вал:

а) валы с прямой осью, поддерживающей вращающиеся части машин *(вращающиеся и неподвижные);*

б) валы сложной ступенчатой конструкции;

в) валы с винтовой поверхностью.

Проведенный анализ группирования поверхностей показал, что кластерный анализ является количественным инструментом классификации поверхностей деталей с позиции измерения, для описания которых необходимы их размерные характеристики. Он позволяет провести выборку на несколько групп по исследуемому признаку, проанализировать группы (как группируются признаки), группировку объектов (как группируются объекты). С применением аппарата кластерного анализа определяем основные признаки, оказывающее основное влияние на точность и целесообразность контроля и определяем коэффициент сложности измерения (1), который является количественным выражением идеологии предлагаемой методики процесса контроля (показатель, прогнозирующий эффективность использования средств контроля, имеющихся в производственной системе).

$$1-\frac{\sum\limits_{zi} K_{zi}}{\sum\limits_{zij} V_{zij}} \qquad (1)$$

где K_{zi}– оказатель на основе возможности группирования поверхностей по однородности с позиции контролируемых параметров; *Vzij* – возможное средство измерения, которое можно использовать для контроля *j*-го контролируемого параметра, *i*-ой поверхности *z*-ой детали.

При назначении рекомендаций по методики контроля комплексный показатель сложности измерения (1) должен быть больше или равен базовому показателю (закрепленному за определенной группой деталей).

Разработанная классификация контролируемых деталей предполагает:

– снижение времени на смену и переналадку средств контроля,

– снижение возможности простоя, в случае если средство контроля в данный момент используется для измерения другой детали (выбирается альтернативное средство измерения).

Таким образом, расчет и анализ коэффициента сложности с позиции измерения позволяет создание универсальной методики процесса измерений деталей сложной геометрии с перспективой использования на машиностроительных предприятиях. Это позволит уменьшить затраты на производство изделия в целом при одновременном обеспечении требуемой точности получения и увеличении производительности труда.

Литература:

1. Решетникова Е.П. Совершенствование разработки технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей в условиях механообрабатывающих производств / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // науч. сб.: Современные тенденции развития науки и технологий.-2016.-№ 7-1.-С.116-120.

2. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки [Текст] / П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. - 2002. - N 1. - С. 10-14.

3. Решетникова Е.П. Совершенствование контрольно – измерительных процедур сложнопрофильных поверхностей в технологической подготовке машиностроительных производств / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // сб. мат. науч.-техн. конф. «Инновации. Технологии. Производство», Рыбинск.-2015.-С.90-94.

4. Митин С.Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем [Текст] / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 44-47.

5. Коршунов А.И., Якимович Б.А. Разработка элементов информационной системы машиностроительного предприятия с использованием показателя конструктивно-технологической сложности/ А.И. Коршунов, Б.А. Якимович, // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 33-40.

6. V.G. Fedorov. Six-axis coordinate measuring machines. Measurement Techniques, July 2008, Volume 51, Issue 7, pp. 724-725.

7. Координатно-измерительные машины и комплексы / А.И. Пекарш, С.И. Феоктистов, Д.Г. Колыхалов, В.И. Шпорт // CALS-технологии. - 2011. - № 3. - С. 3648.

8. Джунковский А.В. Определение оптимального количества точек при измерении колец подшипников качения на координатно-измерительных машинах / А.В. Джунковский, В.П. Суслин, Д.А. Холодов // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы межд. науч. конф. МГТУ «МАМИ». - С. 62-67.

9. Cha'o-Kuang Chen, Chien-Hong Liu. A study on analyzing the problem of the spherical form error. Precision Engineering. - 2000. - Volume 24. - Pp. 119-126.

Creating the classification complex-surfaces precision parts

Reshetnikova E.P.[a], Bochkarev P.Yu.[b]

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya st., Saratov, 410054 Russian Federation
[a]purpose22@mail.ru, [b]bpy@sstu.ru

Keywords: classification complex-surfaces details, precision parts, design automation, industrial system, process engineering, improvement of quality design choices

In the article the classification of high-precision components of complex shape with the aim of improving the quality of design solutions at the development stage of the technological process of their processing. The analysis of approaches to technological preparation of production and organization of manufacture of such parts is shown imperfection, as at the stage of processing and technological training. One of the insufficiently explored issues in the automation of the design process is a method of inspection of the processed complex surfaces. Development of a system of classification of the surfaces of the part to retrieve the data of the measurement process involves analysis and preliminary classification of facilities. Despite the high complexity of the geometry of the studied items and a different character arising from processing errors, such items can be grouped based on common characteristics, types of processed elements and surfaces used machines and ways to solve problems.

УДК 621.757

Разработка устройства для сборки уплотнительных соединений типа «эластичный кольцевой элемент – канавка отверстия»

Тараховский А.Ю.

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская 33, г. Севастополь, Россия
AYTarakhovskiy@sevsu.ru

Ключевые слова: уплотнительные соединения, эластичный кольцевой элемент, деформация, качество, сборка

Раскрываются специфические задачи сборки уплотнительных узлов, содержащих эластичную кольцевую деталь. Указано, что для монтажа уплотнительного кольца во внутреннюю канавку базовой детали его необходимо предварительно деформировать таким образом, чтобы радиус описанной окружности деформированной формы вписывался в цилиндрическую ограничивающую поверхность базовой деталью. Определены условия деформирования уплотнительного кольца, исключающие его повреждения при сборке, и выявлены причины возникновения нежелательных остаточных деформаций. Рассмотрены этапы установки уплотнительного кольца в канавку базовой детали и определен этап, оказывающий решающее влияние на надежность работы уплотнительного устройства. Проведено группирование эластичных кольцевых элементов по геометрической форме. Разработана структура кодирования базовой детали исходя из геометрической характеристики. Для разграничения задач сборки, обоснованного анализа методов монтажа приведена типизация базовых деталей.

В современных условиях отечественное машиностроение сможет обеспечить выполнение Государственной программы №328 «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» только при условии, что сможет обеспечить выпуск новейших изделий стабильного качества в кратчайший срок.

В процессе производства изделий ведущая роль принадлежит сборке как завершающему этапу, на котором формируются основные показатели качества, надежность и долговечность при эксплуатации выпускаемых объектов [1]. Опыт передовых промышленно развитых стран свидетельствует, что часто обеспечить автоматическую сборку изделий не удаётся даже в условиях массового производства, несмотря на то, что трудоёмкость сборочных работ в машиностроении составляет 30…40%, а себестоимость достигает 50% от общих затрат на изготовление изделий [2].

Стабильное качество выпускаемой продукции можно обеспечить при автоматизации технологических процессов. В последнее время наметился значительный рост продажи промышленных роботов. К 2019 году более 1,4 миллиона новых промышленных роботов будут установлены на заводах по всему миру - таков последний прогноз Международной федерации робототехники [3]. Из них более 80% будет задействовано при переносе грузов и выполнении сварочных работ. На автоматизацию сборочных процессов будет ориентировано не более 4% новых промышленных роботов. Это связано в первую очередь с высокой трудоёмкостью программирования, которая при частой смене номенклатуры выпускаемой продукции становиться недопустимо большой. Поэтому, на сегодняшний момент особую актуальность приобретает разработка универсального механизированного сборочного инструмента, пригодного для высокоэффективного многономенклатурного серийного производства изделий стабильного качества и обеспечивающего переналадку технологических средств в кратчайший срок.

Узлы, включающие эластичный кольцевой элемент (ЭКЭ) и жесткую базовую детали (БД), широко используются в конструкциях машин и приборов всех отраслей современного производства. Уплотнительные соединения, в которых посадочным местом для ЭКЭ является внутренняя радиальная канавка, являются наиболее распространенными вследствие высо-

кой технологичности и конструктивной простоты. Сопряжение собираемых деталей может быть достигнуто только при деформировании ЭКЭ.

Требования, предъявляемые к сборочному устройству исходя из стандартов качества [4]:

1. Отсутствие контакта ЭКЭ с поверхностью базовой детали в процессе сборки (разрушение, спиральное скручивание).
2. Отсутствие при сборке деформаций ЭКЭ, превышающих, допустимый предел, при котором полное восстановление исходной формы ЭКЭ становиться невозможным.

Требования, предъявляемые к сборочному устройству исходя из условий собираемости [4]:

1. Отсутствие контакта ЭКЭ с поверхностью базовой детали в процессе сборки.
2. Исключать смещение ЭКЭ относительно центра канавки в продольном направлении при сборке
3. Обеспечивать отсутствие зависания ЭКЭ при досылке его в канавку базовой детали.

В связи с этим, первоочередным является выбор способа деформирования кольца для эффективного уменьшения его габаритных размеров, что позволило бы вписать кольцо в цилиндрическую ограничивающую поверхность с зазором. Такая задача решается, когда кольцу обеспечивается прогиб выступом внутрь.

Соответствующая данному случаю, деформация показана на рис. 1. Здесь наружный упор 1 обеспечивает изгиб кольца внутрь, так что соответствующая точка М1 упругой линии приближается к точке М4 противоположного участка; внутренние же упоры 2 и 3 максимально сводятся друг к другу и симметричные участки кольца касаются в соответствующих точках М2 и М3.

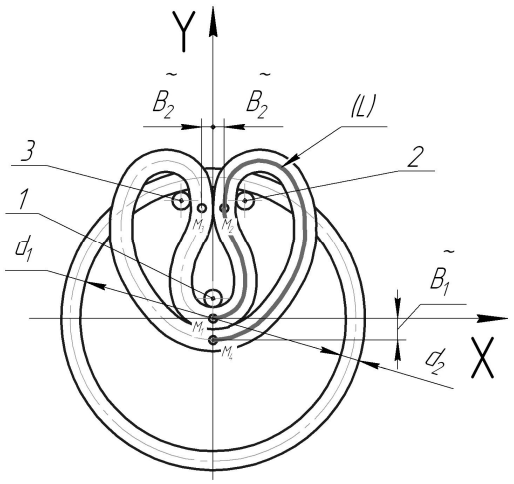


Рис. 1. Деформация кольца

После деформации кольцо можно подавать к канавке базовой детали деформирующим органом без контакта с уплотняемой поверхностью. Возможность разрушения или закручивания кольца исключаются, так как кольцо подается к канавке с зазором. Увеличивается и жесткость кольца, заневоленного упорами деформирующего органа. В таких условиях комплекс из исполнительного механизма и деформированного им эластичного кольца можно условно считать жесткой присоединительной деталью.

Как показали теоретические исследования, изложенные в [5], расстояние $2\tilde{B}_2$ между внутренними упорами должно быть минимальным, т.е. $2\tilde{B}_2 = 2d_2$. Однако в таких условиях наружный упор не сможет переместиться из исходной позиции к центру кольца для создания прогиба внутрь, а после отвода наружного упора кольцо останется в деформированном состоянии.

Для устранения указанного противоречия необходимо процесс деформирования кольца проводить в следующей последовательности:

– расположить внутренние упоры на расстоянии, близком по величине к внутреннему диаметру d_1 кольца;

– обеспечить прогиб кольца выступом внутрь;

– свести внутренние упоры до расстояния $2d_2$;

– после подачи деформированного кольца к канавке осуществить отвод наружного упора;

– возвратить внутренние упоры в исходное положение.

Разработано устройство (рис.2), отличающееся простотой конструкции, в котором внутренние упоры установлены на поворотных рычагах сменной оправки.

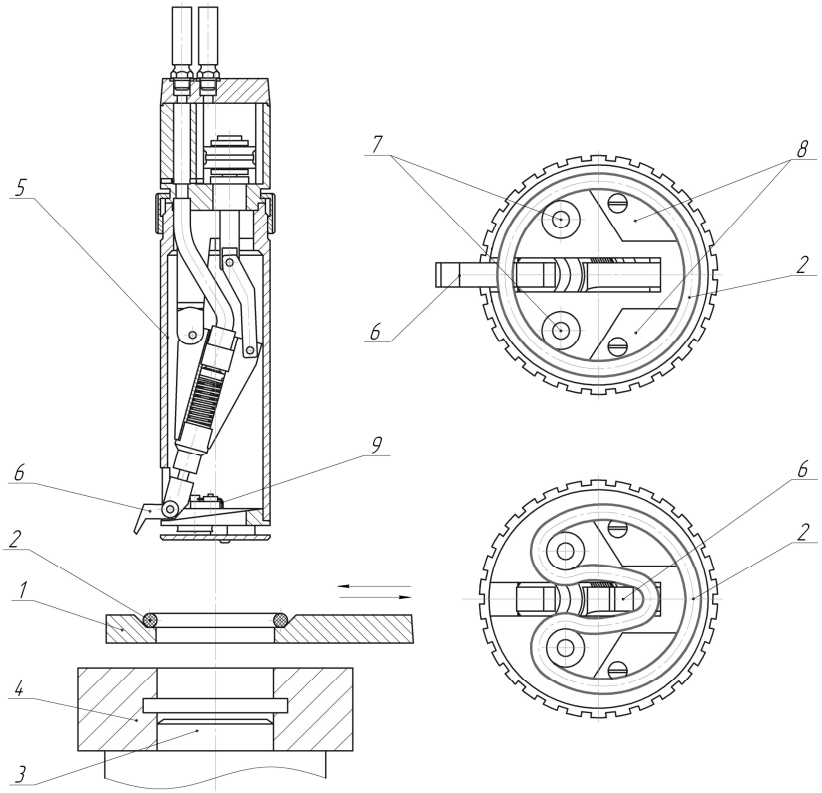


Рис. 2. Устройство для сборки уплотнительных соединений

Шибер 1 устройства при движении влево подает уплотнительное кольцо 2 на рабочую позицию, где на подставке 3 размещена базовая деталь 4, так что верхний торец подставки располагается вровень с канавкой детали. На штанге устройства закреплен механизм 5 осевых и радиальных перемещений стержневого прижима с наружным упором 6 и цилиндрическая оправка с поворотными рычагами 7. На рычагах размешены внутренние упоры 8. Для уменьшения сил трения внутренние упоры могут быть выполнены в виде роликов. Штанга спускается вниз и упоры 8 оказываются внутри кольца, а упор 6 - снаружи. Соответствующие привода механизма 5 перемещают наружный упор последовательно в осевом и на заданную величину радиальном направлениях (т.е. вниз и вправо), что приводит к деформированию кольца. При этом рычаги 7 поворачиваются вокруг осей, преодолевая сопротивление пружин 9. Внутренние упоры сближаются, и радиус R_{on} окружности описанной вокруг деформированного кольца уменьшается. Ось оправки 5 проходит через центр описанной окружности. Поэтому величину перемещения стержневого прижима удобно всегда задавать относительно центра оправки. Далее шибер возвращается в исходное положение за следующим кольцом. Штанга вводит деформированное кольцо в отверстие базовой детали и подает к канавке. Затем наружный упор поднимается вверх, снимая деформирующее воздействие на

кольцо. Пружина разводит рычаги с внутренними упорами в исходное положение. Кольцо распрямляется и устанавливается в канавку базовой детали. Торцы подставки 3 и оправки 5 не позволяют кольцу распрямиться мимо канавки. Штанга поднимается в исходное положение, выводя исполнительный механизм из отверстия детали. Собранное уплотнительное соединение снимается с оправки, после чего цикл повторяется.

С эффектом уменьшения R_{on} связано ещё одно положительное следствие: деформированная форма делает кольцо более жестким, что, несмотря на его эластичность, позволяет выполнять сложные перемещения кольца в пространстве. Использование привода, перемещающего прижим на любую заданную величину, делает устройство универсальным.

Литература:

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В.Фролов (пред.) и др. М.:Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Т. III-5 / [А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. 2001. – 640 с.

2. Гусев А.А. Высокоэффективное решение проблемы серийной автоматической сборки изделий на основе целенаправленного построения комплекта связей, обеспечивающего многократное увеличение допусков сборочной системы / А.А. Гусев, И.А. Гусева, К.А. Хайбуллов К.А. // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2008. № 2 (6). С. 346-355.

3. IFR press release -World Robotics Report 2016, www.ifr.org/news/ifr-press-release/world-robotics-report-2016-832/

4. Новосёлов Ю.К. Обоснование требований к механизированному и автоматизированному процессу сборки уплотнительных соединений с внутренними канавками / Ю.К. Новосёлов, А.Ю. Тараховский // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2011. № 27. С. 11-16.

5. Тараховский А.Ю. Анализ параметров, влияющих на процесс сборки уплотнительных соединений типа «эластичный кольцевой элемент - канавка отверстия» / А.Ю. Тараховский // Вісник СевНТУ. 2012. № 128. С. 234-241.

Development of a device for assembling sealing of connections of type "elastic annular element - the groove holes"

Tarakhovskiy A.Yu.

Sevastopol State University, Street. University, 33, Sevastopol, Russia
AYTarakhovskiy@sevsu.ru

Keywords: sealing compounds, O-ring, deformation, quality, assembly

Specific tasks of assembly of sealing units containing an elastic ring part are disclosed. It is indicated that for mounting the sealing ring into the internal groove of the base part, it must be previously deformed in such a way that the radius of the circumscribed circumference of the deformed shape fits into the cylindrical surface bounding the base part. The conditions for the deformation of the sealing ring, excluding its damage during assembly, are determined, and the causes of undesirable residual deformations are revealed. The stages of installation of the sealing ring in the groove of the base part are considered and the stage determining the reliability of the sealing device operation is determined. The elastic ring elements are grouped in a geometrical form. The structure of the coding of the base part is developed based on the geometrical characteristic. To differentiate the assembly tasks, a well-founded analysis of installation methods, the basic parts are typed.

УДК 621.9

Организация структуры комплекса проектных процедур для автоматизации технологической подготовки механообрабатывающего производства высокоточных изделий с учетом требований сборки

Назарьев А.В.[a], Бочкарёв П.Ю.[b]

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина», 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.
[a]alex121989@mail.ru, [b]bpy@sstu.ru

Ключевые слова: сборочное производство; комплекс проектных процедур технологической подготовки производства; высокоточные изделия; граф размеров, граф сопряжений элементов сборочной единицы; граф технологического процесса

Проблема совершенствования машиностроительных производств приобретает первостепенное значение. Требуемая точность высокоточных изделий достигается при традиционных методах изготовления усложнением технологического оборудования и использованием информационных и измерительных технологий. В настоящее время функциональная точность высокоточных изделий превзошла точность обрабатывающего и сборочного оборудований почти на порядок. Это привело к возникновению проблемы достижения заданного качества и точности высокоточных изделий при их изготовлении. На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, отсутствует наиболее приближенная к реальным требованиям концепция системы в целом. В данной статье формируется структура комплекса проектных процедур, который основывается на установлении связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств. Также в статье рассматриваются математическая модель представления и анализа деталей и сборок (исходными данными являются полученные графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров) и подход для автоматизации расчета технологических размерных цепей (исходными данными являются граф технологического процесса и размерные цепи).

Перед современным производством стоит задача выпуска в короткий срок небольшими партиями изделий высокой функциональной точности. Унификация и организация группового производства позволяют обеспечить выпуск небольших партий изделий в заданные сроки, а требуемая точность достигается при традиционных методах изготовления усложнением технологического оборудования и использованием информационных и измерительных технологий. Но как только требуемая функциональная точность изделий (приборов и машин) превзошла точность обрабатывающего и сборочного оборудования почти на порядок, возникла проблема достижения заданного качества и точности изготовления высокоточных изделий при их изготовлении [1]. Решение данной проблемы достигается в большинстве случаев затратными способами в виде многочисленных переборок, доработок и уточнения конструкции, поскольку эти требования в серийном производстве находятся на грани максимально технологически достижимых. Кроме того, значительные трудности, особенно на этапе сборочного производства, вызывает влияние непознанных и неуправляемых причин, вызывающее непрогнозируемый разброс заданных эксплуатационных характеристик [2, 3, 4]. На рис. 1 представлены методы достижения точности при сборке изделий (методы достижения точности замыкающего звена).

Представленные методы достижения точности сборки не являются универсальными и зависят от типа производства и конструктивных особенностей изготавливаемых изделий. Например, метод селективной сборки обеспечивает требуемое качество изделий из деталей, точность изготовления которых значительно меньше требуемой функциональной; он обеспечивает низкую себестоимость изготовления изделия, но эффективен только в массовом производстве. Кроме того, при сборке высокоточных изделий, в основном, не предусматривает-

ся возможность использования методов селективной сборки, индивидуальной пригонки и регулирования, а применяются производственные приемы достижения точности, связанные с доводочными работами, что негативно сказывается на длительности и стоимости сборочного цикла.

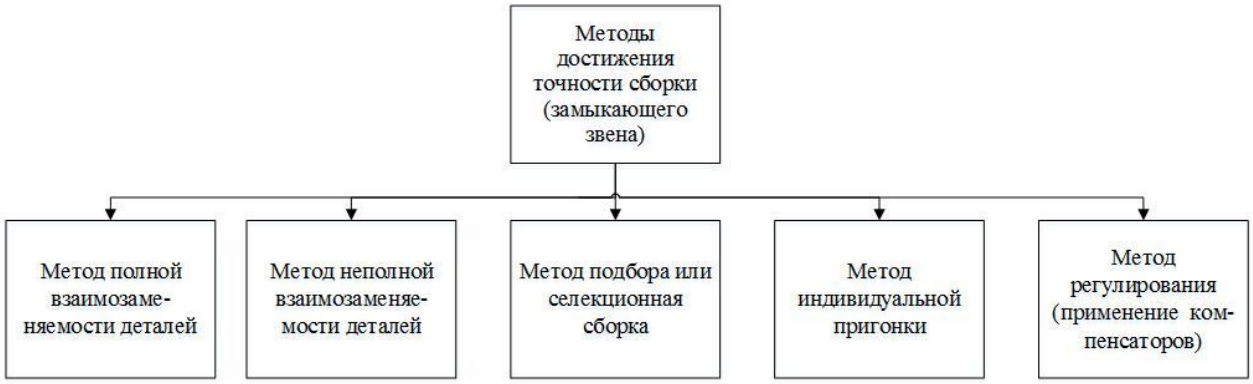


Рис. 1. Методы достижения точности замыкающего звена

Именно поэтому необходимо проведение исследований по созданию комплексного подхода к решению существующих задач в машиностроении, особенно сборки высокоточных изделий, т.к. основными особенностями эффективного функционирования машиностроительных предприятий являются сжатые сроки и высокое качество технологической подготовки производства (ТПП) [3, 4]. На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, таких как повышение качества и точности собираемых изделий, снижение затрат на материалы, внедрение ресурсосберегающих технологий и т.п. Отсутствует отвечающая реальным требованиям концепция системы в целом [2].

Предлагается подход (комплекс проектных процедур), который основывается на установлении связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия. В общем виде связь представлена на рис. 2.

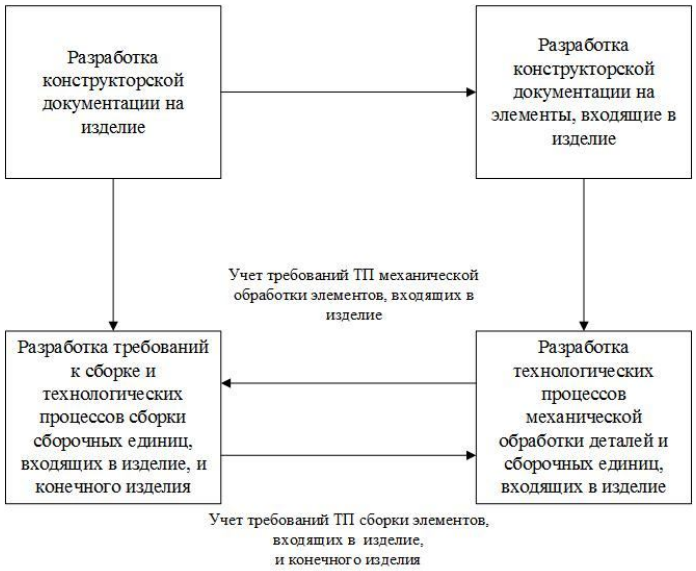


Рис. 2. Связь между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств

Данный подход позволит в зависимости от складывающейся производственной ситуации выбирать оптимальные технологические процессы обработки элементов, учитывающих требование последующей сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП. Анализ исходных данных и разработка рацио-

нальных технологических процессов в системе автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛ-ТП) [5, 6, 7] включает в себя несколько этапов.

На начальных этапах проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, задействованных в сборке, и технологический размерный анализ множества возможных вариантов технологических процессов, разработанных в САПЛ-ТП. Исходными данными для проведения конструкторского размерного анализа являются конструкторская документация на сборочное изделие и детали, задействованные в сборке, и, полученные на основе обработки конструкторской документации, базы данных.

Рис. 3. Структура комплекса проектных процедур

На основе исходных данных проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, участвующих в сборке. В ходе него определяются критичные требования сборки и детали, входящих в эти требования. На рис. 4 показаны высокоточное изделие «Гиромотор» и расчет отдельных критичных требований к его сборке (А, Б и У - конструкторские размеры деталей, участвующие в расчете каждого из требований), а на рис. 5 рассмотрены детали, размеры которых задействованы при расчете критичного требования к сборке «Выступание втулки пакета статора над осью» (А - конструкторские размеры деталей, задействованных в требовании).

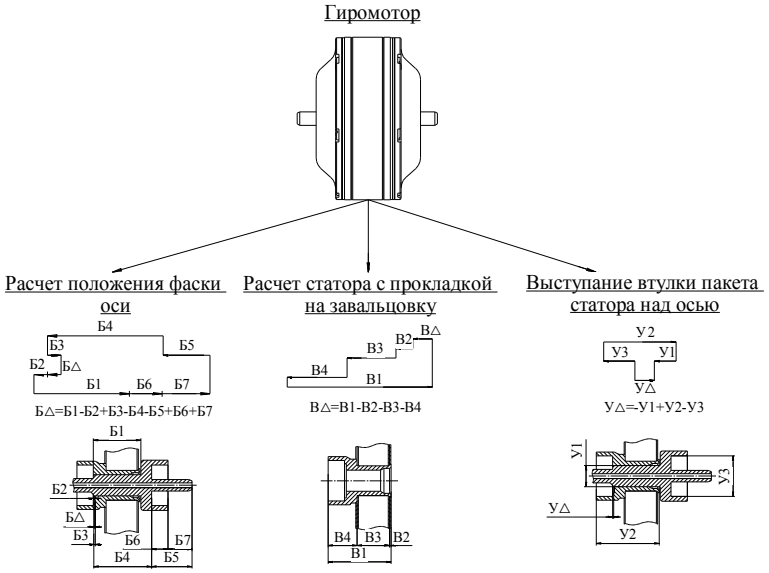


Рис. 4. Высокоточное изделие «Гиромотор» и расчет отдельных требований к его сборке

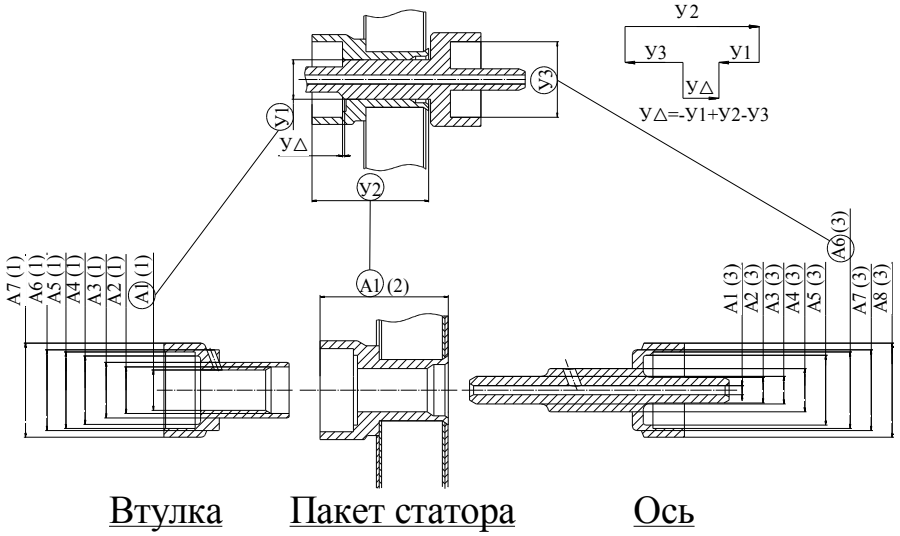


Рис. 5. Расчет требования «Выступание втулки пакета статора над осью»

Размерные связи машиностроительных деталей (сборочных изделий) представляются графом, вершины которого обозначают элементарные поверхности, а ребра – размерные связи между ними. В результате конструкторского размерного анализа формируются графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров. Для автоматизации этапа применена математическая модель представления и анализа деталей и сборок, исходными данными для которой являются полученные графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров [8]. Размерная связь между сборочными операциями характеризуется параметрами геометрических контуров формы и положения, определяющими взаимное расположение в пространстве как отдельных контуров, так и самих элементов сборочной единицы. Для развития информационной базы системы автоматизированного проектирования размерных цепей предлагается расширить понятие исходной схемы в виде графа связанных размерных цепей, где граф размеров содержит не менее двух простых циклов. Каждому простому циклу, включающему в себя замыкающее звено размерной цепи, соответствует алгебраическое уравнение простой размерной цепи, а число уравнений при сложной структуре размерных связей равно числу простых циклов в графе размеров. В этом случае при фиксированном размере замыкающего звена размерной цепи остальные звенья образуют инварианты связанных размеров простых циклов в виде ребер графа $c_{i1},...,j_n \Leftrightarrow 1$. Таким образом, устанавливается органическая взаимосвязь между графом размеров и графом сопряжений элементов сборочной единицы. Граф размеров может быть истолкован как результат развертки графа сопряжений до уровня

геометрических контуров, образующих элементы изделия, и наоборот, граф сопряжений может быть истолкован как свертка графа размеров. Образуется множество, состоящее из множества А элементов изделия и множеств $F(a_i)$ геометрических контуров этого изделия, соединяемых размерами:

$$A = (A, F(a_1), F(a_2), ..., F(a_n)).$$

Затем строится блочная булева матрица (1):

$$[A \times A] =$$

$$\begin{array}{c} \begin{matrix} A & F(a_1) & ... & F(a_n) \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} [A \times A] & [A \times F(a_1)] & ... & F(a_n) \\ [F(a_1) \times A] & [F(a_1) \times F(a_1)] & ... & [F(a_1) \times F(a_n)] \\ ... & ... & ... & ... \\ [F(a_n) \times A] & [F(a_n) \times F(a_1)] & ... & [F(a_n) \times F(a_n)] \end{bmatrix} \end{array} \begin{matrix} A \\ F(a_1) \\ ... \\ F(a_n) \end{matrix} \qquad (1)$$

блоки которой имеют следующее содержание: *[A × A]* - матрица, соответствующая графу сопряжения *G = (A,C)*; *[A ×F(a$_i$)]* - матрица, описывающая расчленение a_i на геометрические контуры *F(a$_i$)*; *[F(a$_i$) × A]* - матрица, описывающая вхождение геометрических контуров *F(a$_i$)* в *A*; *[F(a$_i$) × F(a$_i$)]* - матрица, соответствующая графу собственных размеров a_i; *[F(a$_i$) × F(a$_j$)]* - матрица, соответствующая графу размерных связей контуров элементов a_i с контурами a_j, эта матрица характеризует несобственные размеры сопряжений a_i с a_j. В физическом смысле размеры сопряжений являются зазорами (или натягами) между сопрягаемыми поверхностями различных элементов.

Очевидно, если величина зазора $|l_{(i)j}| \neq 0$, то $D^{\alpha}_{i(j)} = 1, d^{\alpha}_{i(j)} = \left| l_{(i)j} \right|$.

В графе размеров неизвестными являются несобственные размеры сопряжений и замыкающее звено размерной цепи. При расчете сборочных размерных цепей могут решаться прямая и обратная задачи.

Влияние размеров сопряжений на замыкающее звено размерной цепи зависит от структуры графа сопряжений и, как следствие, от структуры сборочной размерной цепи. Если граф сопряжений - линейный, а размерная цепь – простая, то размеры сопряжений не влияют на замыкающее звено размерной цепи, поскольку при соединении элементов конструкции зазоры в местах сопряжения становятся равными нулю. В этом случае расчет сборочной размерной цепи осуществляется известными методами [8].

Таким образом, математическая модель, исходными данными которой являются граф сопряжений сборочной единицы и граф размеров, позволяет автоматизировать проведения конструкторского размерного анализа сборок и деталей.

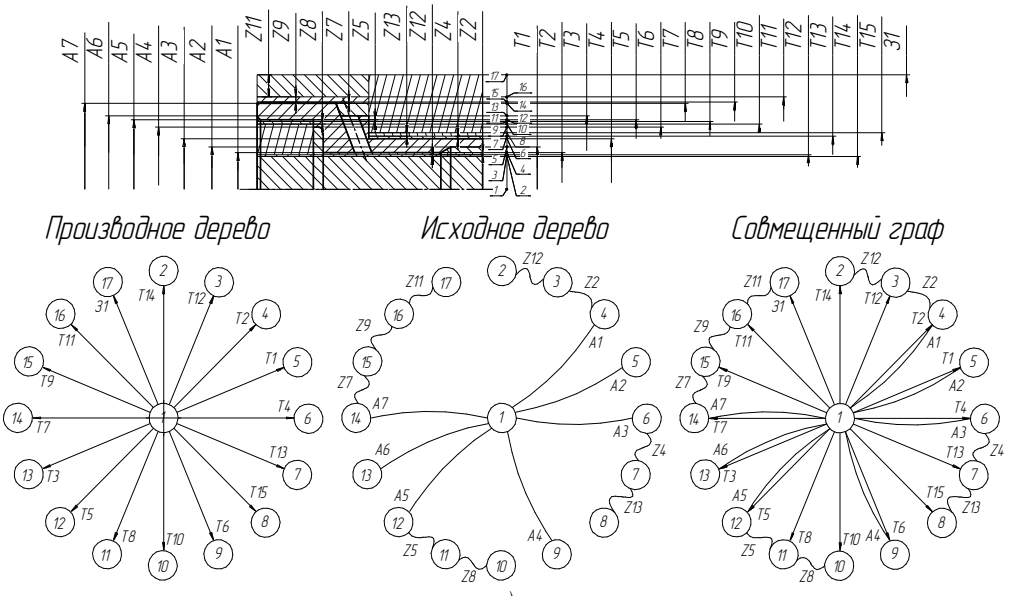
Проектирование технологических процессов в настоящее время невозможно без участия технологов, что приводит к субъективному подходу при принятии решений на стадии ТПП и, как следствие, снижению показателей эффективности работы производственных систем при реализации технологических процессов. Кроме того, разработка технологических процессов неавтоматизированными методами в условиях многономенклатурного производства позволяет анализировать ограниченное число вариантов на отдельных этапах проектирования, что приводит к потере качества технологических решений и увеличению сроков ТПП. Одним из подходов, позволяющих автоматизировать ТПП, является САПЛ-ТП, обеспечивающая параллельное проектирование технологических процессов для заданной группы деталей в рассматриваемый период времени с учетом реально складывающейся производственной ситуации [5, 6, 7].

Исходными данными для технологического размерного анализа является множество вариантов технологических процессов изготовления деталей, задействованных в сборке, полученное в САПЛ-ТП.

Технологический размерный анализ заключается в построении графов возможных технологических процессов изготовления деталей. Граф представляет собой совмещение двух деревьев: производного и исходного. Производное дерево отображает технологические

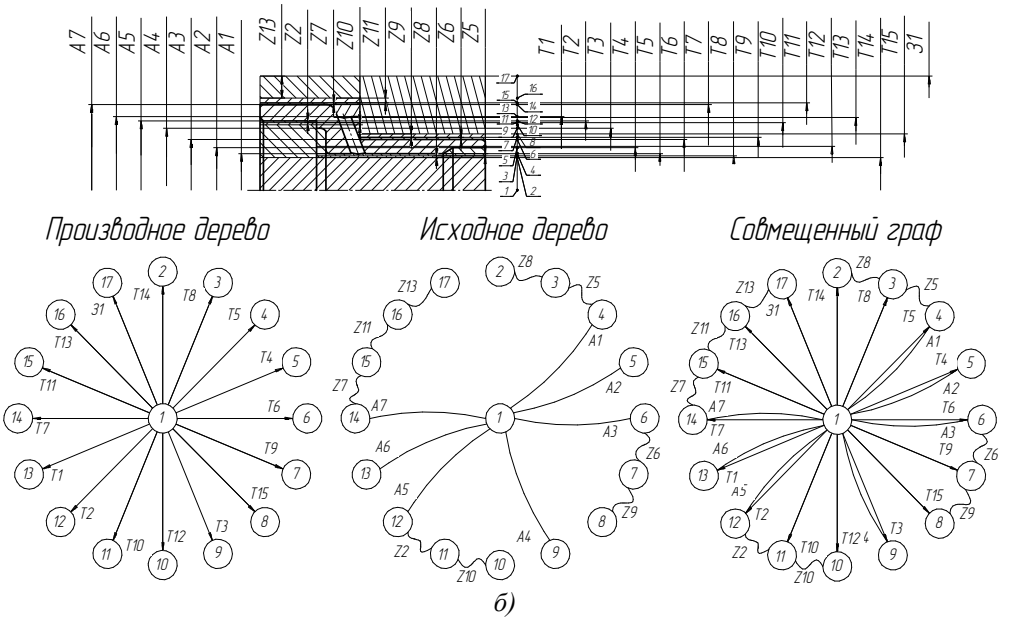
размеры, а исходное дерево – конструкторские размеры и размеры припусков. Таким образом, граф технологического процесса позволяет в закодированной форме представить геометрическую структуру технологического процесса обработки и является его математической моделью. Применение таких математических моделей позволит выбирать технологические процессы обработки элементов, удовлетворяющие требованиям по точности изготовления и требованиям сборки изделия.

На рис. 6 (а, б) представлены размерные схемы (радиальное направление) двух вариантов технологических процессов для детали «Ось» и их расчет на точность с применением теории графов, где А - конструкторские размеры, Т - технологические размеры, З – размер исходной заготовки, Z – припуски на механическую обработку.



а)

Рис. 6 а. Размерная схема и расчет на точность для технологического процесса №1 детали «Втулка»



б)

Рис. 6 б. Размерная схема и расчет на точность и для технологического процесса №2 детали «Втулка»

Для автоматизации расчета технологических размерных цепей использован подход, исходными данными для которого являются граф технологического процесса и размерные цепи. В нем используются две матрицы: номинальных размеров и допусков. Преимущества данного подхода: отсутствие необходимости выявления увеличивающих и уменьшающих звеньев, отдельных размерных цепей и составления уравнений расчета; для расчета всех

размеров и их допусков требуется составить только две матрицы смежности – допусков и номинальных размеров и размерную цепь; алгоритм не требует особой нумерации поверхностей; позволяет автоматизировать расчеты цепей отклонения формы и расположения; одинаково подходит для размерного расчета технологических процессов деталей как типа «тело вращения», так и для более сложных изделий. [9, 10].

На заключительном этапе выбирается множество технологических процессов изготовления деталей, удовлетворяющих требованиям сборки, из которых определяется вариант рационального технологического процесса с учетом складывающейся производственной ситуации. Выбор варианта рационального технологического процесса осуществляется по следующим критериям:

- время реализации технологического процесса;
- количество операций технологического процесса;
- производственные мощности предприятия (наличный парк станков, технологическая оснастка, средства измерения и прочие условия, при которых должна осуществляться обработка детали);
- себестоимость изготовления детали.

Заключение. В данной статье представлена структура и проанализированы возможные решения реализации комплекса проектных процедур, обеспечивающего эффективное выполнение сборочных операций на основе связи между ТПП обрабатывающего и сборочного производств высокоточных изделий. Реализация данного подхода в САПЛ-ТП является актуальной, т.к. комплекс проектных процедур позволит учитывать реально складывающуюся производственную ситуацию и выбирать рациональные технологические процессы обработки деталей с учетом требований сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП.

Предлагаемый подход прошел производственные испытания в условиях филиала ФГУП «НПЦАП» - «ПО «Корпус».

Литература:

1. Падун Б.С. Взаимодействие процессов механического и сборочного производства // Приборостроение. 2014. №8 С.12-15.
2. Семенов А. Н. Проблемы теоретического обеспечения сборки высокотехнологичных изделий / А.Н. Семенов // Инструмент и технологии. - 2004. - № 21 - 22. - С. 122 -124.
3. Суслов А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.
4. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник / Б.М. Базров. - М. : Машиностроение, 2005. - 736 с.
5. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки [Текст] / П.Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. - 2002. - N 1. - С. 10-14.
6. Митин С.Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем [Текст] / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 44-47.
7. Назарьев А.В. Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий машиностроения и приборостроения / П.Ю. Бочкарев, А.В. Назарьев // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2016. Т. 1. №.12. С. 28-34.
8. Гречников Ф.В. Проектирование технологических процессов сборки по критериям точности / Ф.В. Гречников, С.Ф.Тлустенко // Вестник СГАУ. - 2011. №3-4. С.38-43.
9. Thimm G. A graph theoretic approach linking design dimensioning and process planning. Part 1: Designing to process planning / G. Thimm, G.A. Britton, S.C. Fok // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2004. – P. 261–271.
10. Мухолзоев А.В. Алгоритм модуля автоматизированного расчета технологических размерных цепей [Текст] / А.В. Мухолзоев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т.15, №3. – С. 48-55.

Organization of structure of complex of design procedures of automatization of process design of machining of high-precision units taking into account demands of assemblage

Nazaryev A.V.[a], Bochkaryov P.Yu[b].

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russian Federation
[a]alex121989@mail.ru; [b]bpy@sstu.ru

Keywords: assembly production; complex of design procedures; process design; high-precision units; graph of the sizes; graph of the mating of elements of assembly; system of automated sequencing of manufacturing methods

The problem of improving machine-building production is of paramount importance. The required precision is achieved with the traditional methods of manufacturing. They are: the complication of the processing equipment and the applying of the information technologies and measurement technologies. At present, the functional precision of the high-precision products (the devices and the machines) has surpassed the precision of the machining equipment and the assembly equipment almost by a decade. This leads to the problem of the achieving of the specified quality and accuracy of the high-precision products during their manufacture. Now there are just the segmental solutions for some specific tasks of these issues, such as the upgrading of the quality and the precision of the production, the reduction of the material costs, the adoption of the resource-saving technologies and so on. But the unifying vision of the system meeting the real requirements does not exist. In the present paper the discipline of the holistic approach (complex of design procedures) which provide the effectiveness of the realization of the assembly operations is considered. The effective realization of the assembly operations is based on the links between the process design of the manufacturing of the high-precision products and the process design of the assembly production of the high-precision products. Moreover, mathematical models and approaches of realization of the complex are considered in this paper.

УДК 621.757

Типизация базовых деталей уплотнительных соединений (эластичная кольцевая деталь – канавка отверстия)

Тараховский А.А.[a], Тараховский А.Ю.[b]

Севастопольский государственный университет, ул. Университетская 33, г. Севастополь, Россия
[a]atarahovsky@rambler.ru, [b]AYTarakhovsiy@sevsu.ru

Ключевые слова: уплотнительные соединения, гидравлическое уплотнение, деформация, качество, сборка

Раскрываются специфические задачи сборки уплотнительных узлов, содержащих эластичную кольцевую деталь. Указано, что для монтажа уплотнительного кольца во внутреннюю канавку базовой детали его необходимо предварительно деформировать таким образом, чтобы радиус описанной окружности деформированной формы вписывался в цилиндрическую ограничивающую поверхность базовой деталью. Определены условия деформирования уплотнительного кольца, исключающие его повреждения при сборке, и выявлены причины возникновения нежелательных остаточных деформаций. Рассмотрены этапы установки уплотнительного кольца в канавку базовой детали и определен этап, оказывающий решающее влияние на надежность работы уплотнительного устройства. Проведено группирование эластичных кольцевых элементов по геометрической форме. Разработана структура кодирования базовой детали исходя из геометрической характеристики. Для разграничения задач сборки, обоснованного анализа методов монтажа приведена типизация базовых деталей.

В конструкциях современных машин и приборов в большом количестве содержаться узлы с разнообразными эластичными и упругими деталями. Механизация и автоматизация сборки таких изделий требует решения специфических задач, связанных с легкой повреждаемостью, малой жесткостью, миниатюрностью, повышенными требованиями к качеству поверхности [1].

Технология сборки контактного уплотнительного устройства состоит из двух основных этапов: установки эластичного кольца в канавку и последующей сборки полученного узла с контрдеталью. При этом решающее влияние на надежность работы уплотнительного устройства оказывает первый этап – сборка эластичного кольца с канавкой базовой детали, так как одной из основных причин негерметичности уплотнительных устройств является повреждение эластичной кольцевой детали (ЭКД) при сборке. Треть объема брака возникает по этой причине [3].

Рекомендации по использованию уже известных способов и средств сборки разрознены и противоречивы. Существующие у нас в стране и за рубежом способы сборки не обладают достаточной надежностью и производительностью, а устройства конструктивно сложны и неудобны в эксплуатации. В этих способах совершенно не предусмотрены условия, исключающие повреждения ЭКД, их остаточные деформации.

Для монтажа ЭКД во внутреннюю канавку базовой детали (БД) ЭКД необходимо предварительно деформировать таким образом, чтобы радиус описанной окружности деформированной формы вписывался в цилиндрическую ограничивающую поверхность БД. Технологической особенностью, усложняющей процесс сборки, является также необходимость выполнения и других дополнительных этапов сборочного цикла: восстановление формы деформированной детали, осадки. Важным условием надежного сопряжения является гарантированное восстановление формы за счет упругих свойств материала при снятии деформирующего воздействия. Но измененная форма может оказаться устойчивой. Это потребует дополнительного силового воздействия для восстановления формы на завершающем этапе сборочной операции. Необходимо также предотвращать или устранять сопутствующие монтажу нежелательные деформации, например скручивание, перегибы и т.д. Причиной таких остаточных деформаций являются:

- неправильный выбор вида деформации;
- возможный контакт поверхности ЭКД с поверхностями БД и сборочного механизма.

Процесс сопряжения ЭКД с БД можно разбить на три этапа:

- деформирование ЭКД;
- подача деформированной ЭКД к канавке БД;
- восстановление деформированной формы ЭКД в канавке (собственно сопряжение ЭКД с канавкой БД).

Возникшие в данном случае дополнительные элементы сборочного действия определяют необходимость решения соответствующих технологических задач. С учетом указанных особенностей операцию сборки уплотнительных соединений можно определить следующими элементами [4]:

- подача деталей к месту сборки;
- базирование и фиксация деталей на сборочной позиции;
- ориентирование деталей друг относительно друга;
- деформирование ЭКД;
- подача деформированной ЭКД к канавке БД;
- установка ЭКД в канавку БД за счет восстановления деформированной формы ЭКД;
- выгрузка УС в тару или транспортирование на следующую технологическую позицию.

Рассмотренная последовательность элементов может быть несколько изменена. Например, деформация ЭКД может быть произведена перед ориентированием деталей относительно друг друга, одновременно при подаче ЭКД к канавке и т.п. В сравнении с наиболее общей структурой сборочной операции, в процессе сборки УС появляется новый дополнительный элемент – предварительная деформация ЭКД. Подачу же деформированной ЭКД к канавке БД можно рассматривать, как осуществление сопряжения обычных жестких деталей, а восстановление формы деформированной ЭКД в канавке - как осуществление закрепления деталей в соединении.

Для сборки ЭКД с канавкой отверстия БД необходимо решить ряд технологических задач. Первой технологической задачей является создание необходимой сборочной деформации ЭКД. Второй технологической задачей является осуществление подачи деформированной ЭКД к канавке (с контактом или без контакта об уплотняемую поверхность базовой детали). Третьей технологической задачей является осуществление сопряжения ЭКД с канавкой (за счет упругих свойств ЭКД или принудительно).

В последние годы разработаны, запатентованы и нашли широкое применение новые эффективные конструкции уплотнительных устройств с эластичными кольцевыми деталями (ЭКД) из резины и полимерных материалов с различной формой и разнообразным сечением [4]. По геометрической форме ЭКД можно разделить на четыре группы [2, 5].

В первую группу входят ЭКД с сечением типа круг, квадрат, Х-ринг, Н-ринг, которые можно деформировать как в плоскости, так и в пространстве.

Во вторую группу входят ЭКД при деформации которых необходимо производить оценку вида сечения, так как на некоторых этапах процесса деформирования может произойти увеличение радиуса описанной окружности за счет “выворачивания” бортов. Ко второй группе относятся кольца с П-образным и с V-образным сечением.

В третью группу входят ЭКД для монтажа которых необходимо деформировать одновременно с формой и сечение ЭКД таким образом, чтобы размер деформированного сечения позволял установить ЭКД с зазором в установочный паз.

К четвертой группе относятся ЭКД совмещающие в себе признаки радиального и аксиального уплотнений.

Важным фактором, определяющим процесс сборки УС, являются геометрические характеристики собираемых деталей - БД и ЭКД, которые необходимо обосновать.

Для разграничения задач сборки, обоснованного анализа методов монтажа БД необходимо типизировать. Возможные типы БД отличаются друг от друга сочетанием вариантов геометрической характеристики.

Все уплотнительные устройства по характеру уплотняемых соединений подразделяются на следующие три основные группы [6]:

– для соединений с возвратно-поступательным движением (уплотнение штоков и поршней);

– для соединений с вращательным движением (уплотнение валов);

– для неподвижных соединений (уплотнение доньев, крышек и др.).

Первая и вторая группы – радиальные уплотнения, третья – аксиальные.

С развитием уплотнительной техники появились уплотнения, совмещающие в себе признаки радиального и аксиального. Следовательно, БД можно разделить на три больших класса по признаку уплотнений:

1. БД в которые устанавливаются радиальные уплотнения.
2. БД в которые устанавливаются аксиальные уплотнения.
3. БД в которые устанавливаются комбинированные уплотнения, совмещающие в себе признаки аксиального и радиального уплотнения.

Для разграничения задач сборки, обоснованного анализа методов монтажа БД типизированы (рис. 1).

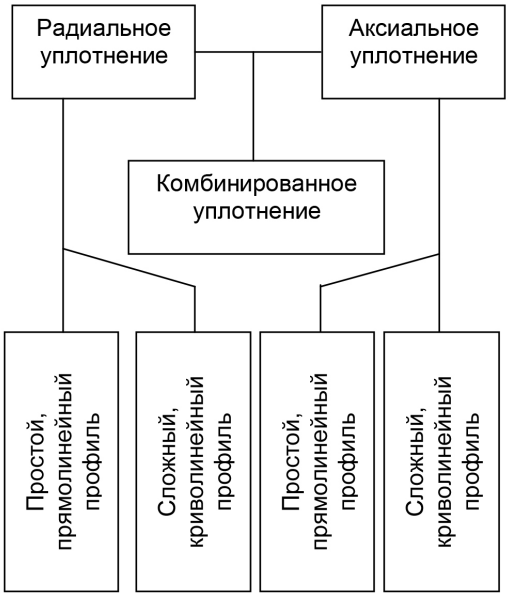


Рис. 1. Схема типов БД

Геометрическая характеристика БД определяет цилиндрическую ограничивающую поверхность (ЦОП). С ЦОП необходимо отождествлять форму деформированного кольца перед его установкой в канавку. ЦОП можно охарактеризовать двумя параметрами: диаметром сечения $D_{цоп}$ и величиной протяженности $L_{цоп}$.

Возможные типы БД отличаются друг от друга сочетанием вариантов геометрической характеристки. Код детали присваивается согласно структуре на рисунке 2.

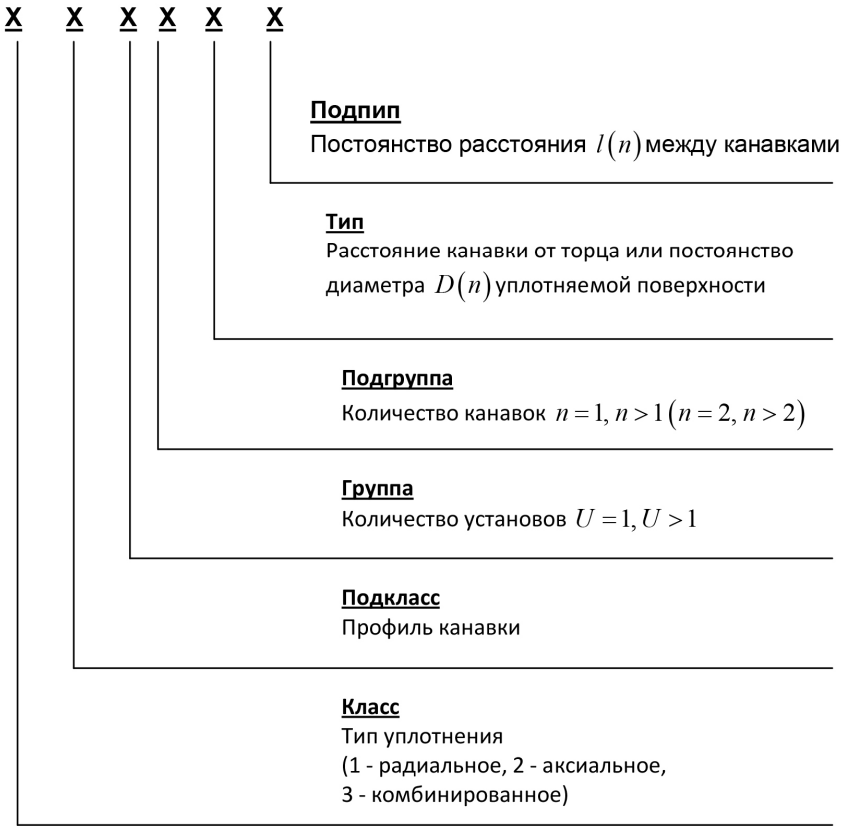


Рисунок 2 – структура определения кода БД

Если базовая деталь содержит только одну канавку, то диаметр сечения $D_{цоп}$ равен диаметру D внутренней уплотняемой поверхности базовой детали, а величина протяженно-

сти $L_{цоп}$ – расстоянию l канавки от торца. При наличии резьбы, проточек и других неровностей, а также, если канавок больше одной, принимаем $n > 1$. В этом случае необходимо использовать приспособления, предохраняющие кольцо от разрушения, либо обеспечить подачу деформированного кольца без контакта с уплотняемой поверхностью. Если D и Δl переменны, изменяются и параметры ЦОП.

При $n \geq 2$ диаметр сечения $D_{цоп}$ уменьшается на 0,5...2 мм. Расстояние l от торца базовой детали до канавки (наиболее удаленной, если $n \geq 2$) определяет протяженность ЦОП и влияет, как будет показано ниже, на выбор способа деформирования: $L_{цоп} = 1$.

Параметры ЦОП и сложность сборочного цикла определяются также числом U установов, предусматривающих изменение положения базовой детали при последовательной подаче кольца к канавкам с обоих торцов. По числу установов базовые детали можно разделить на две группы:

- монтаж ЭКД можно производить с одного торца базовой детали (U=1);
- монтажа ЭКД необходимо производить с двух торцов базовой детали (U>1).

На сложность сборочного цикла также большое влияние оказывает профиль канавки. Условно базовые детали можно разбить на четыре основных подкласса.

В первый подкласс входят базовые детали с простым профилем канавки под ЭКД. Эти посадочные места стандартизированы. В них можно устанавливать как ЭКД I группы (кольца круглого, Х-образного и т.п. сечений), так и часть ЭКД II группы, не требующие для своей установки канавок сложной формы (кольца П-образного, U-образного, Y-образного и т.п. сечений).

Во второй подкласс входят базовые детали со сложным профилем канавки, повторяющим профиль ЭКД (кольца V-образного и Т-образного сечений).

В третий подкласс входят базовые детали с канавкой для установки ЭКД III группы.

В четвёртый подкласс входят базовые детали, содержащие несколько канавой различного профиля.

Таким образом, в понятие геометрической характеристики базовой детали входит комплекс следующих элементов:

- число установов U;
- число канавок n;
- профиль канавок;
- диаметр D уплотняемой поверхности;
- постоянство D;
- величина l, определяющая расстояние от торца до наиболее удалённой канавки;
- постоянство расстояния Δl между канавками.

Литература:

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В.Фролов (пред.) и др. М.:Машиностроение. Технология сборки в машиностроении. Т. III-5 / [А.А. Гусев, В.В. Павлов, А.Г. Андреев и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. 2001. – 640 с.

2. Буренин В.В. Объёмные гидравлические приводы агрегатов технологического оборудования: Учеб. пособие – М.: МАДИ, 1998. – 167 с

3. Воронин А.В. Механизация и автоматизация сборки в машиностроении /А.В. Воронин, А.И. Гречухин, А.С. Калашников и др. – М.:Машиностроение, 1985. – 272 с.

4. Шерешевский А.Н., Тараховский А.Ю. Системный подход к анализу сборки узлов с эластичными кольцевыми деталями /Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. /Редкол.: В.Я.Копп (отв. ред.) и др.; Севастоп. гос. техн. ун-т. – Севастополь, 1999 г. – С.145-149

5. Буренин В.В. Новые конструкции уплотнений для подвижных соединений силовых гидроцилиндров объёмного гидропривода строительных машин и механизмов / Механизация строительства. 2012. № 1. С. 10-14.

6. Голубев А.И., Кондаков Л.А., ред. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение, 1994, 448 с.

Typicalization of the base parts of the sealing joints (elastic annular part – groove of the hole)

Tarakhovskiy A.Yu.[a], Tarakhovskiy A.A.[b]

Sevastopol State University, Street. University, 33, Sevastopol, Russia
[a]AYTarakhovsiy@sevsu.ru, [b]Tartolik@rambler.ru

Keywords: sealing compound, hydraulic seal, deformation, quality, assembly

Specific tasks of assembly of sealing units containing an elastic ring part are disclosed. It is indicated that for mounting the sealing ring into the internal groove of the base part, it must be previously deformed in such a way that the radius of the circumscribed circumference of the deformed shape fits into the cylindrical surface bounding the base part. The conditions for the deformation of the sealing ring, excluding its damage during assembly, are determined, and the causes of undesirable residual deformations are revealed. The stages of installation of the sealing ring in the groove of the base part are considered and the stage determining the reliability of the sealing device operation is determined. The elastic ring elements are grouped in a geometrical form. The structure of the coding of the base part is developed based on the geometrical characteristic. To differentiate the assembly tasks, a well-founded analysis of installation methods, the basic parts are typed.

УДК 669.018(075.8)

Комплексная технология повышение износостойкости деталей пар трения, работающих в водородных средах

Шалыгин М.Г.

Брянский государственный технический университет, б-р 50-лет Октября, 7, Брянск, Россия
migshalygin@yandex.ru

Ключевые слова: термическая обработка, высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; водородное изнашивание; комплексная обработка, водород

В статье рассмотрен вопрос повышения износостойкости деталей, работающих в водородных средах. Приведено полученное общее уравнение связи шага субшероховатости и среднего размера зерна материала. Показано, что субшероховатость более чем на 63% определяется зерном материала. Предложен комплекс технологических операций повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах. В качестве технологических операций повышения износостойкости предлагаются термическая обработка до мелкозернистой структуры, высоковакуумный отжиг для удаления биографического водорода и ионная имплантация для препятствия проникновения эксплуатационного водорода. Приведены режим операций и результаты сравнительных испытаний на износ. Установлено, что предлагаемая комплексная обработка позволяет повысить износостойкость поверхностей трения. Анализ суммарного износа пар трения показал, что увеличение износа контртела не является критическим.

Введение. В большинстве случаев, наряду с другими видами изнашивания [1, 2] в процессе изнашивания деталей машин при трении активное участие принимает водород. Водород присутствует, как в смазывающих материалах, так и в окружающей среде, а также в самих трущихся деталях – биографический водород. Однако, когда детали пар трения работают в водородных средах, зачастую, водородное изнашивание становится основной причиной выхода из строя узлов трения. Наибольшую проблему оно представляет для тех пар трения, где является превалирующим над другими видами изнашивания. Наиболее полно водородное изнашивание проявляется в поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания, в тормозных колодках и дисках, коробках передач, газотурбинном оборудование, насосах для

перекачивания нефтяных вяжущих, в узлах трения речного и морского транспорта, аэрокосмической отрасли и многих других узлах трения. К изготовлению поршневых колец предъявляются повышенные требования. Работая в условиях повышенных температур и углеводородной среды, поршневые кольца подвергаются интенсивному водородному изнашиванию, при этом к точности размеров, к форме кольца и к шероховатости наружной поверхности предъявляются особые требования. Особо остро проблема водородного изнашивания стоит в узлах трения, работающих в водородных средах, что имеет место, в битумных насосах. В связи со сложным профилем зуба, их поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер. Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к сильным шумам при эксплуатации и интенсивному изнашиванию. Водородное изнашивание происходит на атомарном уровне, при этом в современной научной и технической литературе отсутствуют расчетные зависимости, позволяющие определить интенсивность изнашивания на уровне нанонеровностей, или, как принято называть в трибологии, на уровне субшероховатости. Таким образом, целью исследования является технологическое повышение износостойкости узлов трения, работающих в водородных средах.

В результате проведенного регрессионного анализа [3] получено общее уравнение связи шага субшероховатости и среднего размера зерен материала:

$$L_3 = 32{,}10810 + 0{,}20300 \cdot e^{0{,}112957 \cdot S_{mc}}. \qquad (1)$$

Данное уравнение объясняет 63,1% вариации $L_з$ (индекс корреляции R_{SL}*=0,7945.*

Анализ уравнения (1) и полученных теоретических зависимостей [4] показывает, что износ поверхностей трения в условиях водородного изнашивания зависит от зернистости материала поверхностного слоя. В начальный момент трения, в период приработки, происходит смятие выступов шероховатости и образование площадок контакта, и далее износ осуществляется по субшероховатости. В процессе трения зерна деформируются пластически и упруго. Пластическое деформирование зерен приводит к переползанию дислокаций, смещению вакансий, и соответственно, к изменению субшероховатости, которая изменяясь влияет на изнашивание поверхности. В процессе водородного изнашивания, ионы водорода, попадая в кристаллическую решетку и скапливаясь на границах зерен, приводят к образованию новых выступов и впадин субшероховатости. Ранее установлено, что субшероховатость поверхности функционально коррелирует с зернистостью материала. Следовательно, уменьшить значения показателей субшероховатости возможно путем уменьшения размеров зерен. Размер зерен возможно уменьшить, например, путем термической обработки материалов до мартенситной структуры. Учитывая это, для технологического повышения износостойкости таких пар трения необходимо уменьшать зернистость поверхностного слоя, уменьшать содержание биографического водорода, повысить сопротивляемость материала к проникновению эксплуатационного водорода. В качестве такой технологии предлагается:

1. Для уменьшения зернистости поверхностного слоя целесообразно применять поверхностно-пластическое деформирование или термическую обработку (ТО) с образованием мелкозернистой структуры.

2. Осуществлять обезводораживание поверхностного слоя.

3. Заполнять межзеренное пространство другим материалом, который препятствует проникновению водорода в это пространство при эксплуатации в водородной среде.

Методика экспериментального исследования. Все образцы были подвержены термической обработке. Закалке до температуры 840 ^{0}С, охлаждению в воде в течение 1 часа.

Для проведения обезводораживания образцов (ВО) была изготовлена установка, функциональная схема которой была предложена Д.Н.Гаркуновым [1]. Обезводораживание образцов проводилось по следующей технологии [5]. Перед помещением в камеру образцы промывались бензином и четыреххлористым углеродом. После помещение образцов в камеру установки, камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха из камеры до давления $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523К. элек-

тропечь выключалась, и при достижении температуры в камере в 293К. в нее запускался воздух.

Приведенная технология обезводораживания снижает концентрацию водорода в поверхностном слое материала. Однако, согласно [6], через некоторое время в условиях покоя концентрация водорода восстанавливается вследствие его десорбции из глубины материала в поверхностный слой. По этой причине, необходимо заполнить образовавшиеся при десорбции водорода «пустоты» до восстановления его концентрации во всем объеме образца. Таким образом, необходима комплексная технологическая обработка (КО) поверхностей трения деталей машин, которая может включать термическую обработку (ТО), высоковакуумный отжиг (ВО) и ионную имплантацию (ИМ).

Одним из элементов способных снизить водородное изнашивание может являться кремний. Внедрение ионов кремния в структуру кристаллической решетки после обезводораживания, потенциально, позволит не только создать карбиды в поверхностном слое, но и дает возможность ионам кремния занять вакансии, образовавшиеся после десорбции водорода. Энергия связи и коэффициент диффузии ионных пар определяются обоими ионами.

С целью повышения износостойкости обезводороженные образцы были подвержены ионной имплантации (ИМ). Ионное имплантирование осуществлялось на установке Везувий 3-М. В качестве имплантируемого элемента был выбран кремний. Внедрение ионов кремния в структуру кристаллической решетки после обезводораживания потенциально позволяет не только создать карбиды в поверхностном слое, но и дает возможность ионам кремния занять вакансии, образовавшиеся после десорбции водорода. Ионная имплантация проводилась с энергией ионов E = 400 кэВ; плотностью тока ионного пучка j = 60 мкА/см^2; дозой облучения Q = 1000 мкКул /см^2; углом наклона ионного пучка 7^0. Перед помещением образца в камеру установки он нагревался до температуры 220 ^{0}C.

Одной из причин эффективности предложенной технологии может являться то, что при обезводораживании в поверхностном слое образца снижается количество биографического водорода. В то же время при ионной имплантации поверхностный слой насыщается ионами кремния, часть которых может образовать карбиды в поверхностном слое, часть ионов может заполнить собой дефекты кристаллической решетки, такие как вакансии и дислокации, часть ионов может оседать в междоузлиях решетки, создавая твердый раствор внедрения. Все это может препятствовать атомарному водороду, выделившемуся из смазочного материала или водородной среды, интенсивно проникать в поверхностный слой и концентрироваться в дефектах и, как следствие, приводить к водородному изнашиванию и водородному охрупчиванию деталей.

Образцы после ТО, ТО + ВО, ТО + ИМ и комплексной обработки (КО) были испытаны на износ. Все образцы были подвержены термической обработке. В качестве контртел выступала термически обработанная сталь 40х с твердостью и шероховатостью идентичной испытуемому образцу. Нагрузка составляла *P = 50 Н*. В процессе испытаний измеряли износ по массе каждые 1000 метров. За данный путь трения образец совершал 12,7 цикла. Испытания проводились на машине трения в присутствии смазочного материала, в качестве которого выступало минеральное масло Ravenol 20w-50. Температура в зоне трения поддерживалась равной 250 ^{0}C.

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что обезводораживание уменьшает износ по сравнению с термически обработанной сталью, при этом, износ после ТО + ИМ сопоставим с износом при ТО + ВО. Наименее износились образцы после комплексной обработки (КО).

Наиболее износостойким был образец с шероховатостью Ra 0,2 после комплексной обработки, износившейся на 185 мг. В результате дисперсионного анализа экспериментальных данных износа установлено, что материал, обработка и шероховатость значимо влияют на износ. Также анализ показал, что упрочнение ТО+ВО и ТО+ИМ сопоставимы, то есть их влияние на износ равнозначно. Таким образом, на результат износа данные виды упрочнения влияют одинаково и их можно рассматривать как упрочнения, дающих сопоставимый эф-

фект. Из рис. 1 видно, что потеря массы образца после комплексной обработки в 1,3….1,5 раза меньше, чем потеря массы образца после термической обработки и в 1,1…1,2 раза меньше чем после ТО+ВО.

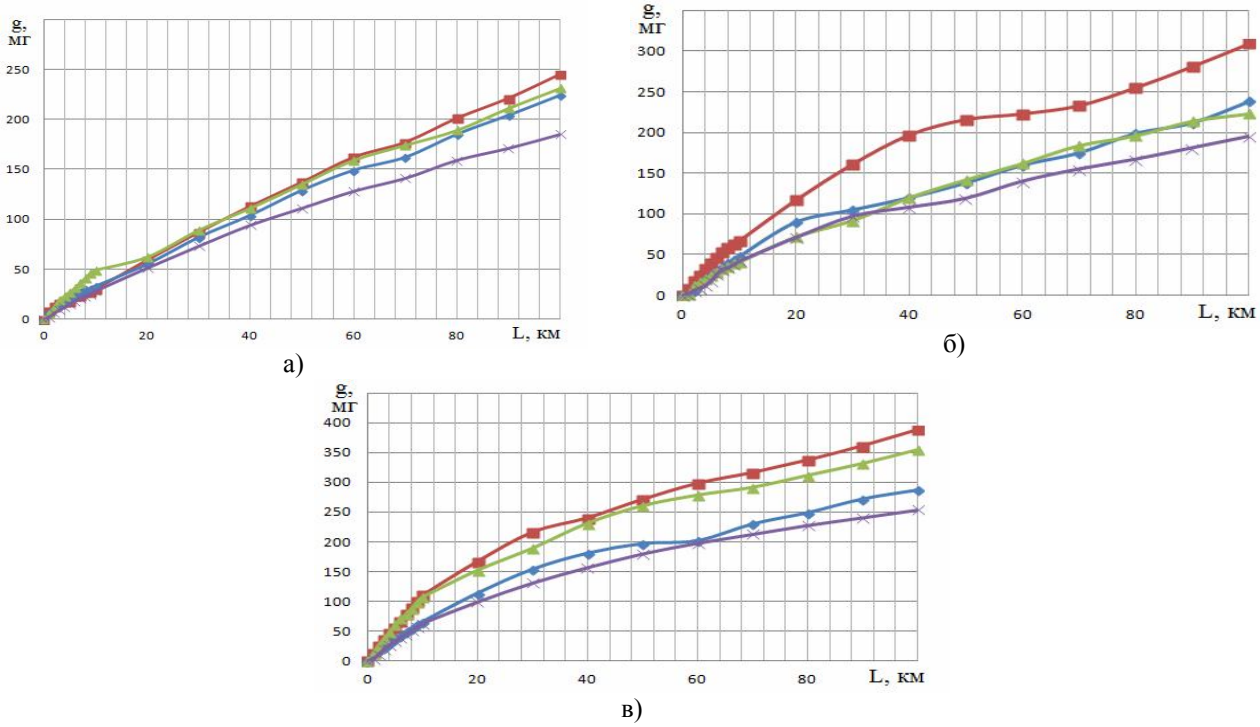


Рис. 1. Износ по массе стали 40х
(■ - ТО; ◆ - ТО+ВО; ▲ - ТО+ИМ; ✿ - КО):
а) Ra 0,2; б) Ra 0,4; в) Ra 1,6

С целью определения влияния проведенных технологических операций на износ контртела был проведен анализ суммарного износа пар трения после 100 км испытаний. В качестве контртел выступала сталь 40х термо- и механически обработанная так же, как и образцы стали при термической обработке. Наименьший суммарный износ был у пары трения сталь 40х13 (*Ra=0,4 мкм*, КО) – сталь 40х13 (*Ra=0,4 мкм*, ТО). В целом, результаты суммарного износа показывают, что проведение комплексной функционально-ориентированной обработки не сказывается критически на износе контртела.

Выводы:

1. Для технологического повышения износостойкости пар трения, работающих в водородной среде, необходимо уменьшить зернистость поверхностного слоя, что возможно путем термической обработки, уменьшить содержание биографического водорода, что возможно путем высоковакуумного отжига, повысить сопротивляемость материала к проникновению эксплуатационного водорода, что осуществимо введением в поверхностный слой ионов кремния.

2. На основе проведенного регрессионного и корреляционного анализов получено общее уравнение связи субшероховатости и зернистости материала, которое показывает, что субшероховатость зависит от зернистости более чем на 63%.

Литература:

1. Гаркунов Д.Н. Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. – М.: Кнорус, 2011. – 408с.
2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320с.
3. Suslov A.G. and Shalygin M.G. The interrelation of the surface subroughness of martensitic steels with their granularity the quality of mechanical processing. AIP Conf. Proc. 1785, 040085 (2016).
4. Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. Наукоемкая технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2017. № 2. С. 19-24.

5. Шалыгин М.Г. Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2016. № 7. С. 10-13.

6. Защита от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – с. 135.

Complex technology of increase of wear resistance of parts of friction pairs operating in hydrogen fluid

Shalygin M.G.

Bryansk state technical University, br 50th-anniversary of October 7, Bryansk, Russia
migshalygin@yandex.ru

Keywords: thermal treatment, high-vacuum annealing; ion implantation; hydrogen wear; complex technology, hydrogen

In the article the question of increase of wear resistance of components operating in hydrogen fluid. Given the derived General equation coupling step of subroughness and the average grain size of the material, that shows subroughness more than 63 percent is determined by the grain of the material. Given the complex of technological operations to increase the wear resistance of friction surfaces of machine components operating in hydrogen fluid. As manufacturing operations improve the wear resistance offered to the heat treatment of fine-grained structure, high-vacuum annealing to remove hydrogen biographical and ion implantation in order to prevent penetration of operational hydrogen. In the article given mode of operations and the results of comparative testing on wear. It is established that the proposed complex technology increases the wear resistance of friction surfaces. Analysis of the total wear of friction pairs showed that the counterbody wear have a not critical increase, compared to current technologies.

УДК 621.454.2

Автоматизация технологических процессов изготовления и монтажа трубопроводов двигателей летательных аппаратов

Ярцев Е.Н.[a], Назаров В.П.

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, 660037, пр. им. газ. «Красноярский рабочий» 31, г. Красноярск, Россия
[a]yartseven.akruks@gmail.com

Ключевые слова: производство, технологический процесс, автоматизация, двигатель

Изготовление и монтаж трубопроводов двигателей летательных аппаратов является сложной технологической задачей, связанной с размещением магистралей в ограниченном пространстве по причине плотной компоновки двигателя.В настоящее время методика, по которой разрабатывается комплект технологической документации на изготовление и монтаж трубопроводов основывается на рекомендациях, указанных в нормативной документации (отраслевых стандартах). При этом такая технология требует большого количества ручного труда и не гарантирует обеспечение оптимальной конфигурации и надлежащего качества продукции. В статье предлагается решение по модернизации технологического процесса сборки двигателя летательного аппарата, направленное на повышение производительности и качества выпускаемой продукции. Приведен алгоритм работы автоматизированной системы изготовления трубопроводов, рассмотрены технические условия для разработки управляющей программы (технологии) гибки трубопроводов на станках с числовым программным управлением.

Введение. Проектирование, изготовление и монтаж трубопроводных систем летательных аппаратов (ЛА) являются сложными задачами, связанными с размещением участков магистралей трубопроводов в ограниченных пространствах, по причине плотной компоновки (рис. 1). В связи с этим, трубопроводы имеют следующие конструктивные особенности [1]:

Рис. 1. Пример компактного расположения трубопроводов
со сложной пространственной геометрией на РД-93

- отсутствие или незначительное число прямолинейных участков;
- колебание конечных координат стыковки трубопровода к элементам ЛА;
- значительный ассортимент применяемых труб.

К трубопроводам предъявляются высокие требования по прочности, жесткости, герметичности, коррозионной стойкости, а также по геометрической точности и состоянию поверхности. В соответствии с заданными нагрузками и условиями эксплуатации основными материалами для изготовления трубопроводов являются легированные хромоникелевые стали (12Х18Н10Т, Х18Н9Т), алюминиевые сплавы (Д16, АМг6), титановые сплавы (ОТ4, ВТ6), жаропрочные сплавы (ХН60ВТ, ХН77ТЮР) и другие материалы с высокими физико-механическими характеристиками.

В настоящее время, на предприятия ракетно-космической и авиационной промышленности при изготовлении трубопроводов применяется так называемый «эталонный метод».

Характерной чертой данного метода является создание на этапе подготовки к производству эталонных трубопроводов, конфигурации и длины которых в точности соответствуют последующим серийным изделиям. Также, эталоны трубопроводов используются для изготовления контрольной и рабочей оснастки и ее проверки в процессе производства серийных изделий.

Эталонные трубопроводы необходимо изготавливать из прочного материала для сохранения конфигурации при эксплуатации в цеховых условиях (условиях серийного производства). Как правило, при изготовлении эталонного трубопровода небольшого диаметра используется металлический пруток, для больших диаметров используется труба с увеличенной толщиной стенки [2].

Использование «эталонного метода» изготовления трубопроводов характерно при производстве многих моделей ракет и самолетов и в настоящее время является ведущим критерием трубопроводного производства. Причиной отсутствия автоматизированного производства, то есть изготовления с использованием 3D-моделей, является ряд следующих факторов:

- отсутствие надлежащего оборудования для оцифровки эталонов и перевода существующих изделий в электронные модели;
- отсутствие оборудования для работы с электронными моделями и обеспечение ряда технологических операций по электронным моделям: гибка, формообразование концов труб, сборочно-сварочные операции и т.д.
- отсутствие остальных узлов летательного аппарата (ЛА) в электронном виде.

При этом, с переходом на виртуальное проектирование и изготовлением современных летательных аппаратов в полностью цифровом виде (Sukhoy Superjet, МС-21, ракета-носитель «Ангара») вопрос о реализации производственных процессов на базе виртуальных

моделей приобретает наибольшую актуальность как единственно возможный способ, обеспечивающий серийное производство трубопроводов в полной мере, соответствующих конструкции изделия.

Существующее применение эталонов в качестве основы для изготовления трубопроводов имеет ряд сложностей и недостатков:

– конструкторская документация в полной мере не определяет геометрию трубопровода, что соответственно требует наличие эталона трубопровода;

– высокая трудоемкость и сложность изготовления эталонов и внедрения в серийное производство;

– невозможность применения эталонов к машинной гибке без доработки конструкции;

– необходимость ручной доработки производимых изделий;

– необходимость использования больших площадей для хранения эталонов, макетов и других референтных элементов на производстве;

– высокая степень участия человеческого фактора в производстве [4].

Существует альтернативный, автоматизированный способ производства трубопроводов на основе электронной конструкторско-технологической документации.

Такая документация создается в специализированных программных средах и содержит в электронном виде информацию о геометрии трубопровода, материале, конфигурации, а также всю технологическую информацию, достаточную для подготовки производства и серийного изготовления.

Внедрение данного метода в производство современных ЛА имеет ряд преимуществ, основными из которых являются:

– ускорение технологической подготовки производства;

– упрощение подготовки программ для гибочных станков с ЧПУ;

– возможность использования контрольно-измерительной машины (КИМ) с компьютерным управлением для контроля геометрии трубопроводов в сравнении с 3D-моделью вместо эталона;

– снижение трудоемкости производства каждого из трубопроводов и уменьшение количества сварных швов (при внедрении современных технологий машинной гибки и формообразования);

– освобождение площадей, занятых для хранения эталонов и рабочих шаблонов.

Вместе с тем переход от производства, основанного на «эталонном методе» к автоматизированному изготовлению требует решения ряда конструкторских, технологических и организационных вопросов:

– отработка технологии снятия с эталонов 3-х мерных электронных моделей с помощью контрольно-измерительной машины (КИМ);

– адаптация геометрии трубопровода для повышения технологичности гибки с помощью станков с числовым программным управлением;

– разработка системы позиционирования элементов сварных трубопроводов для прихватки/сварки (внедрение универсальной сварочной оснастки и роботизированной сварки);

– внедрение системы электронного документооборота как внутри предприятия-изготовителя, так и между конструкторским бюро (разработчиком) и изготовителем.

Алгоритм работы автоматизированной системы изготовления трубопроводов. На предварительном этапе производится определение длины заготовки трубопровода. Для трубопроводов, имеющих изгибы и прямолинейные участки, длина заготовки рассчитывается методом развертки осевой линии:

$$L = \sum_{1}^{i} l + \sum_{1}^{i} R_i \cdot \varphi_i$$

где $\sum_{1}^{i} l -$ – сумма длин прямолинейных участков; $\sum_{1}^{i} R_i \cdot \varphi_i -$ сумма длин криволинейных участков; $R_i -$ радиус кривизны осевой линии трубопровода на *i*-участке; $\varphi_i -$ угол изгиба на *i*-участке.

Исходные геометрические параметры и данные по конфигурации узла трубопровода можно получить двумя способами:

– измерив эталон-трубопровод с помощью современных контрольно-измерительных машин (рис. 2). Данный способ наиболее подходит для внедрения системы на этапе серийного изготовления двигателей ЛА;

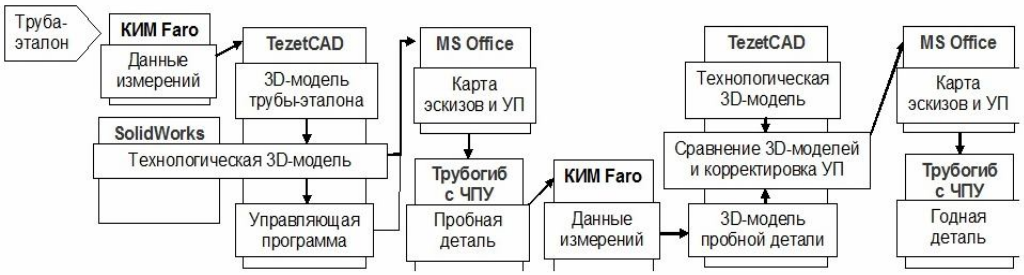


Рис. 2. Алгоритм работы системы (вариант 1)

– получив геометрические параметры трубопровода из созданной конструктором 3D-модели двигателя (при этом необходимо корректировать координаты мест стыковки путем их измерения контрольно-измерительной машиной и внесения соответствующих изменений в 3D-модель) (рис. 3, рис. 4). Этот способ предназначен для внедрения автоматизированной системы на этапе отработки (освоения) производства современных изделий, поскольку они проектируются с применением 3D моделирования.

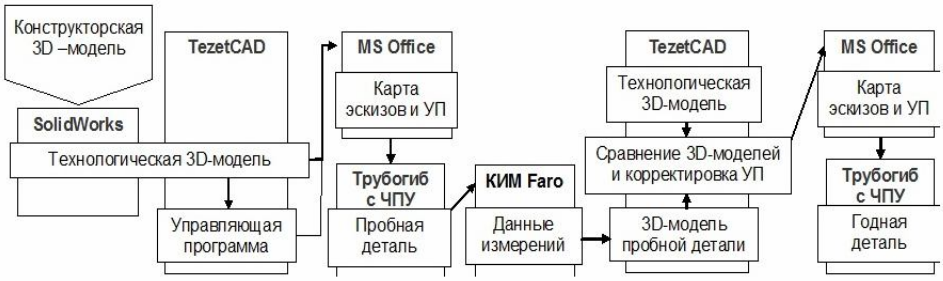


Рис. 3. Алгоритм работы системы (вариант 2)

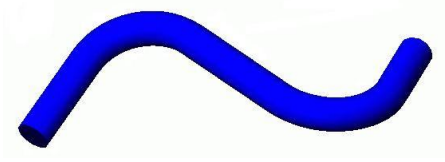


Рис. 4. 3D-модель трубопровода

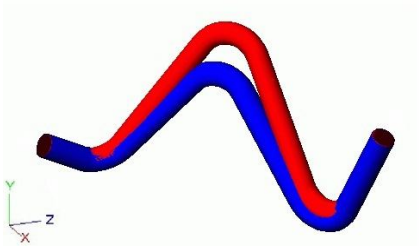


Рис.5. Графическое представление результатов измерения изготовленного трубопровода в сравнении с эталонной 3D-моделью

На следующем этапе необходимо создать управляющую программу (УП) для осуществления гибки трубы на станке с числовым программным управлением, для чего может использоваться специальное технологическое программное обеспечение (например, TezetCAD). Затем данные управляющей программы необходимо внести в блок управления станка с ЧПУ для осуществления гибки трубы с последующим контролем конфигурации при помощи КИМ (путем сравнения исходной 3D-модели и данных, полученных в процессе из-

мерения изготовленного трубопровода) (Рис. 5). В случае успешного прохождения операции контроля труба допускается в дальнейшую работу.

Заключение. Применение представленной системы позволит исключить сложный и трудоемкий процесс эталонирования трубопроводов, снизить долю ручного труда в технологическом процессе производства двигателей ЛА, повысить точность изготовления и сборки трубопровода, исключить необходимость подгибки трубопровода при монтаже.

Литература:

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей / Г. Г. Гахун, В.И. Баулин, В.В. Володин. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Обеспечение качества ракетного двигателя путем внедрения автоматизированной системы изготовления и монтажа трубопроводов сложной конфигурации / Е. Н. Ярцев, В. П. Назаров, Н. С. Теряев // Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 ноября 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – Ч. 1. – С. 205-206.
3. ОСТ 92-1600-84 Производство трубопроводов. Общие технические условия. Эталонирование трубопроводных систем, гибка труб и формообразование концов трубопроводов.
4. ОСТ 92-1601-84 Производство трубопроводов. Общие технические условия. Сборка, окраска, маркировка, очистка, контроль и монтаж трубопроводов.
5. Рубинович Л. Д. Изготовление и монтаж трубопроводов. Справочное издание / Под ред. Л.Д. Рубиновича. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 232 с.
6. Теория и практика изготовления элементов трубопроводов летательных аппаратов / С. И. Феоктистов и др. М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т". - Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. технический ун-т, 2013. - 88 с.
7. McAllister E. W. Pipeline rules of thumb handbook: a manual of quick, accurate solution to every day pipeline engineering problem / E. W. McAllister. – Burlington, Ma: Gulf professional publ., 2009. – 747 p.

Automation of manufacturing pipelines of aircraft engine technological processes

Yartsev E.N.[a], Nazarov V.P.

Reshetnev Siberian State Aerospace University 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[a]yartseven.akruks@gmail.com

Keywords: workflow, technological process, automation, engine

Manufacturing and installation of pipes of aircraft engines are a difficult task associated with the placement of pipes in confined spaces due to the dense arrangement of the engine. Currently, the industry standards describe the main method by which developed a set of technical documentation for the manufacture and placing of pipes into engine. Thus this technology requires large amounts of manual labor and do not guarantee the optimal configuration software and the quality of products. The article offers a solution to modernize the process of assembly of the aircraft engine, aimed at increasing productivity and product quality, as well as the algorithm of the automated manufacturing system piping.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

УДК 621.01; 621.81

Внедрение сферического индентора в упругопластическое упрочняемое полупространство

Огар П.М.[a], Горохов Д.Б.[b], Кожевников А.С.[c], Угрюмова Е.В.[d]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]ogar@brstu.ru ,[b]denisgorohov@mail.ru, [c]kozhevnikovart@inbox.ru, [d]weblab@brstu.ru

Ключевые слова: внедрение сферы, упругопластический контакт, закон Майера, степенной закон упрочнения Холломона, экспонента упрочнения

Описано внедрение сферического индентора в упругопластическое упрочняемое полупространство. Свойства упругопластического материала соответствуют степенному законом Холломона (Hollomon's power law). При этом использован эмпирический закон Майера, связывающий усилие при вдавливании сферы с диаметром отпечатка. Изначально закон Майера не связан с механическими характеристиками испытываемого материала. В исследованиях использованы зависимости взаимосвязи экспоненты упрочнения n с индексом m закона Майера, полученные С.И. Булычевым. При этом учтены эффекты «sink-in/pile-up». Указано на отсутствие необходимости определения констант закона Майера. Представлены выражения, связывающия величину относительного усилия с относительной величиной внедрения индентора. Определены границы применения предложенных выражений. Приведено сравнение полученных выражений с экспериментальными данными и с опубликованными результатами конечно-элементного анализа.

Введение. Вопросы упругопластического внедрения сферического индентора постоянно находятся в центре внимания исследователей, в частности в областях поверхностного пластического деформирования, трибомеханики и др., так как они недостаточно изучены и некоторые предлагаемые решения требуют уточнений и усовершенствований [1]. Одной из важных проблем при этом является учитывание упрочнения материала [2-3]. Подход авторов для решения этой проблемы изложен в работах [4-6 и др.]. Суть метода заключается в применении диаграммы кинетического индентирования и метода подобия деформационных характеристик. При этом используется понятие «пластической твердости», как характеристики сопротивления материала контактной пластической деформации. Пластическая твердость представляется в виде:

$$HD = K_h\left(\varepsilon_y, n\right)\cdot \sigma_y ,$$

где σ_y – предел текучести; $K_h\left(\varepsilon_y, n\right)$– параметр, определенный методом «двукратного вдавливания» [4] с использованием результатов конечно-элементного анализа [7]; ε_y, n – характеристики упругопластического тела Холломона.

В ряде работ [8, 9] для учета упрочнения материала при упругопластическом контакте использовался эмпирический закон Майера, который устанавливает связь между усилием при вдавливании сферы и диаметром отпечатка. В работе [9] подчеркивается влияние индивидуальных физико-механических свойств реальных материалов на особенности формирования контактных упругопластических деформаций. Однако при этом в явном виде характеристики упругопластического упрочняемого тела не учитываются, что является недостатком данного подхода.

Целью настоящей работы является использование вышеуказанных характеристик упрочняемого тела при применении закона Майера.

Решение задачи. При описании упругопластического упрочняемого тела широкое распространение получил степенной закон Холломона (Hollovon's power law), согласно которому связь между напряжениями σ и деформациями ε при одноосном растяжении-сжатии описывается уравнениями

$$S = \begin{cases} \varepsilon E, & \varepsilon \le \varepsilon_y; \\ K\varepsilon^n, & \varepsilon \ge \varepsilon_y; \end{cases} \tag{1}$$

где E – модуль упругости; n – экспонента упрочнения.

Константа K находится из условия равенства σ при ε_y. Тогда второе уравнение из выражения (1) можно представить в виде:

$$\frac{S}{\sigma_y} = \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_y}\right)^n = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right)^n, \; \varepsilon > \varepsilon_y . \tag{2}$$

где $\sigma_y \approx S_y$, σ_y - предел текучести, $\varepsilon_y = \sigma_y / E$.

Учитывая, что предельная равномерная деформация $\varepsilon_u = n$, экспонента упрочнения определяется из следующего выражения [10]:

$$n \ln n - n\left(1 + \ln \varepsilon_y\right) - \ln \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = 0 , \tag{3}$$

где σ_u – предел прочности.

Первым описал поведение материала в упругопластической области E. Mayer, связывая нагрузку P с диаметром отпечатка d

$$P = Ad^m . \tag{4}$$

Эмпирический закон Майера часто представляют в виде:

$$\frac{4P}{\pi d^2} = A^*\left(\frac{d}{D}\right)^{m-2} , \tag{5}$$

где m, A, A^* – константы, причем A^* имеет размерность напряжения.

Выражение в левой части представляет собой среднее давление на площадке контакта, которое называют твердостью по Майеру:

$$\frac{4P}{\pi d^2} = \frac{P}{\pi a^2} = p_m = HM , \tag{6}$$

где a – радиус площадки контакта.

Используя понятие максимальной твердости по Майеру:

$$HM_{\max} = HM\big|_{d=D} ,$$

из выражений (5) и (6) имеем:

$$p_m = HM_{\max}\left(\frac{d}{D}\right)^{m-2} = HM_{\max}\left(\frac{a}{R}\right)^{m-2} . \tag{7}$$

Максимальная твердость по Майеру связана с твердостью по Бринеллю соотношением [11]

$$HM_{\max} = 2HB / k_m , \tag{8}$$

где $$k_m = m^{\frac{m}{2}}\left(m-1\right)^{1-m}\left(m-2\right)^{\frac{m-2}{2}} . \tag{9}$$

Из работы [12] следует, что

$$\sigma_u = k_\sigma \cdot HB , \tag{10}$$

где $k_\sigma = 0.333$ для углеродистых и перлитных низколегированных сталей, для других материалов значения k_σ в зависимости от m приведены в [13].

По данным С.И. Булычева [15, 16] предельная равномерная деформация ε_u, соответствующая σ_u равна

$$\varepsilon_u = n = 0.961\left(m-2\right) . \tag{11}$$

Отсюда

$$m = 2 + 1.041n\,. \tag{12}$$

Из выражения (10) с учетом (2) и (11) имеем:

$$HB = \frac{\sigma_y}{k_\sigma}\left(\frac{n}{e}\right)^n \cdot \varepsilon_y^{-n}\,. \tag{13}$$

Для усилия $P = \pi a^2 p_m$ с учетом (7), (8) и (13) получим:

$$P = 2\pi\frac{\sigma_y a^2}{k_\sigma \cdot k_m}\left(\frac{n}{e}\right)^n \varepsilon_y^{-n}\left(\frac{a}{R}\right)^{m-2}, \qquad \frac{P}{E^* R^2} = \frac{2\pi}{k_\sigma \cdot k_m}\left(\frac{n}{e}\right)^n \varepsilon_y^{1-n}\left(\frac{a}{R}\right)^m. \tag{14}$$

С учетом (12)

$$\frac{P}{E^* R^2} = \frac{2\pi}{k_\sigma \cdot k_n}\left(\frac{n}{e}\right)^n \varepsilon_y^{1-n}\left(\frac{a}{R}\right)^{2+1.041n}, \tag{15}$$

где E^* - приведенный модуль упругости,

$$k_n = \frac{(2+1.041n)^{1+0.5205n}}{(1+1.041n)^{1+1.041n}}(1.041n)^{0.5205n}\,.$$

Так как $a = \sqrt{2Rh_c} = \sqrt{2Rc^2 h}$, где h_c – глубина, по которой происходит контакт сферы с полупространством, h – глубина внедрения от исходной поверхности, то имеем:

$$\frac{P}{E^* R^2} = \frac{2\pi}{k_\sigma \cdot k_n}\left(\frac{n}{e}\right)^n \varepsilon_y^{1-n}\left(\frac{2c^2 h}{R}\right)^{1+0.5025n}. \tag{16}$$

Параметр $c^2 = h_c / h$ можно определить согласно данных работы [16]:

$$c^2 = c^2(n) = 1.4e^{-0.97n}\,. \tag{17}$$

Выражение (17) хорошо согласуется с результататами конечно-элементного моделирования [17].

Нижним пределом использования полученных выражений является $\overline{a}_y = a_y / R$, соответствующее ε_y. Согласно [16] при вдавливании сферы деформация описывается зависимостью

$$\varepsilon = \alpha\left(\frac{d}{D}\right)^\beta = \alpha\left(\frac{a}{R}\right)^\beta, \tag{18}$$

где $\alpha = 0.15 + 1.85(m-2)^{1.4}$, $\beta = 1.18\left(1 + (m-2)^{1.6}\right)$,

или с учетом выражения (12): $\alpha = 0.15 + 1.85(1.041n)^{1.4}$, $\beta = 1.18\left(1 + (1.041n)^{1.6}\right)$.

Тогда $\overline{a}_y = \left(\frac{\varepsilon_y}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}}$, (19)

а соответствующее усилие определяется из выражения (15).

Верхний предел определяется из условия $h_c = c^2 h^* = R$.

С учетом выражения (17): $\frac{h^*}{R} = 1.4e^{-0.97n}$, (20)

а соответствующее усилие определяется из выражения (16).

Сравнение с экспериментальными исследованиями. Для оценки полученных результатов сравним их с экспериментальными данными, приведенными в [18]. В этой работе для расчета параметров упругопластического контакта авторы использовали обобщенную кривую деформирования и метод переменных параметров упругости. Экспериментальное исследование заключалось в определении радиуса пятна при вдавлении закаленного стального шарика (HRC 63...64) с радиусом кривизны 2,5 мм в образцы из материалов, приведенных

в таблице. Механические свойства материалов образцов определялись испытаниями на растяжение и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства материалов [18]

No	Materials	σ_y, MPa	σ_u, MPa	E, GPa	ν
1	Armko-iron	256	410	210	0.3
2	Steel 45	480	725	204	0.26
3	Steel 30ХГСА	667	942	215	0.3
4	Steel 30ХГСА	1207	1344	215	0.3
5	Copper M2	69	196	132	0.35
6	Duraluminium	265	392	72	0.3
7	Titanium BT6	687	883	118	0.32

Для получения аналитических зависимостей для каждого материала из уравнения (3) были определены значения экспонент упрочнения n. Значения εy определялись по формуле

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E^*} = \sigma_y \cdot \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu^2}{E} \right), \tag{21}$$

где ν_i и E_i - коэффициент Пуассона и модуль упругости материала индентора.

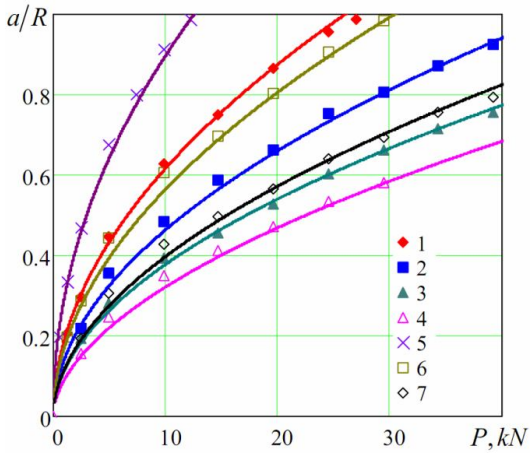


Рис.1. Зависимость относительного радиуса контакта от нагрузки P

На рис. 1 экспериментальные данные [18] представлены точками, координаты были «оцифрованы» при обработке результатов. Линии обозначают соответствующую зависимость, рассчитанную по формуле. (15) в среде Mathcad. Как следует из рис. 1, имеет место хорошее совпадение между аналитическими зависимостями и экспериментальными данными.

Предложенный подход предполагает альтернативу более сложному методу описания упругопластического внедрения сферы на основе диаграммы кинетического индентирования [5, 19, 20], который использовался при решении задач упругопластического контактирования шероховатых поверхностей [6, 21-23] и контактирования жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия [24, 25].

Заключение.

1. Используя эмпирический закон Майера, который изначально не связан с физико-механическими свойствами материалов, получены выражения (15) и (16) позволяющие определить радиус площадки контакта и величину внедрения сферы в упругопластическое упрочняемое полупространство.

2. При этом учитываются характеристики упругопластического тела $\varepsilon_y = \sigma_y / E^*$, экспонента упрочнения n и отсутствует необходимость определения констант закона Майера m и A^*.

3. Определены границы применения предложенных выражений.

4. Сравнение полученных результатов с опубликованными экспериментальными данными по внедрению сферического индентора в упругопластические среды позволяет рекомендовать предложенные зависимости для решения практических задач.

5. Дальнейшее совершенствование предлагаемого метода заключается в уточнении параметр k_σ (уравнение 10) для различных групп материалов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания на выполнение НИР № 2014/10 на 2016 г. (проект № 1754).

Литература:

1. Матлин М.М., Лебский С.Л., Мозгунова А.И. Закономерности упругопластического контакта в задачах поверхностного пластического упрочнения. М.: Машиностроение-1, 2007. 218 с.

2. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

3. Донсков А.С. Математическое моделирование процесса внедрения жесткого штампа в упругопластическое полупространство // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 3. С. 16-22.

4. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние характеристик упрочняемого материала на упругопластическое внедрение сферической неровности // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 12. С. 29-34.

5. Ogar P.M., Tarasov V.A. Kinetic Indentation Application to Determine Contact Characteristics of Sphere and Elastoplastic Half-Space // Advanced Materials Research Vol. 664 (2013) pp. 625-631.

6. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 282 с.

7. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // J. Mech. Phys. Solids 2005. № 53. P. 2037-2069.

8. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.

9. Болотов А.Н., Мешков В.В.,Сутягин О.В., Васильев М.В. Влияние упрочнения на характеристики упругопластического контакта микронеровностей поверхностей // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. № 4(2). С. 313-315.

10. Огар П.М., Горохов Д.Б. Определение параметров упругопластического тела для расчетов характеристик контакта при вдавливании сферы // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1 (29). С. 28-32.

11. Огар П.М., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Учет характеристик упрочняемого материала при применении эмпирического закона Майера // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4. С. 50-54.

12. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.

13. Gaško M.; Rosenberg G. Correlation between hardness and tensile properties in ultra-high strength dual phase steels – short communication // Materials engineering - Materiálové inžinierstvo. 2011. v. 18. P. 155-159.

14. Булычев С.И. Переход от диаграмм вдавливания к диаграммам растяжения с учетом упрочненного поверхностного слоя // Деформация и разрушение материалов. 2010. №2. с.43-48.

15. Булычев С.И. Твердость и гистерезис на пределе текучести // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 41-45.

16. Kucharski S.; Mroz Z. Indentation of plastic hardening parameters of metals from spherical indentation tests // Materials Science and Engineering. 2001. A. v. 318. P. 65-76.

17. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.

18. Matlin M., Kazankina E., Kazankin V. Mechanics of unitial contact // Mechanika. 2009. 2(76). P. 20-23.

19. Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. К вопросу упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 14-16.

20. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Описание взаимодействия жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 163-169.

21. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1. С. 17-22.

22. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Трибомеханика упругопластического контакта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2. С. 116-122.

23. Огар П.М, Тарасов В.А. Проектирование затворов специальной трубопроводной арматуры. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. 191 с.

24. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контактирование жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.

25. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние толщины упругопластического покрытия на относительную площадь контакта // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4. С. 14-17.

The penetration of a spherical indenter into an elastoplastic hardened half-space

Ogar P.M.[a], Gorokhov D.B.[b], Kozhevnikov A.S.[c], Ugrumova E.V.[d]

Bratsk State University, Makarenko st. 40, Bratsk, Russia
[a]ogar@brstu.ru ,[b]denisgorohov@mail.ru, [c]kozhevnikovart@inbox.ru, [d]weblab@brstu.ru

Key words: spherical indentation, elastoplastic contact, Mayer law, Hollomon power law, hardening exponent

A method for determining contact characteristics occurring in spherical indentation is defined. The properties of an elastic-plastic material are corresponds to the hardening Hollomon power law. In this case the empirical Meyer law relating a spherical indentation load with an indentation diameter is used. Initially, the Meyer law is not related to the mechanical characteristics of the test material. The study used the relations between the strain hardening exponent n and the Meyer law constant obtained by S.I. Bulychev. The effects of «sink-in / pile-up» are considered. It is shown that there is no need to define Meyer law constants. Expressions relating the value of the relative load to the relative magnitude of the pentration of the indenter are presented. The scope of application of the proposed equations is defined. A comparison of the obtained results with the experimental data is given.

УДК 539.3

Расчет и оценка прочности композиционного фланца

Бохоева Л.А.[1,a], Баиров С.А.[1,b], Арапова И.А.[1,c], Кондратьева А.Н.[1,d]

[1]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40в стр. 1, Улан-Удэ, Россия
[a]bohoeva@yandex.ru,[b]bairov.sofron@gmail.com, [c]iraarapowa@yandex.ru,[d]Lakki-4118@mail.ru

Ключевые слова: фланец, композиционные материалы, механика деформируемого тела, механика композиционных материалов

В статье представлен расчет напряженно-деформированного состояния фланцев, выполненных из композитного материала (стеклопластик) и стали. Создана 3D-модель фланца в программе SolidWorks. Для расчета фланца из стеклопластика следует учитывать неоднородность конструкции и анизотропию материала. С помощью пакета Mathcad определены жесткостные характеристики (модули Юнга, модуль сдвига, коэффициенты Пуассона) многослойного композита, состоящего из 40 слоев, разбитых на три пакета. Данные пакеты отличаются углом укладки волокон в слоях и числом слоев в пакете. Характеристики композита определены по известным жесткостным характеристикам k-того слоя. Задача расчета на прочность многослойной конструкции фланца решена в осесимметричной постановке с помощью метода конечных элементов в пакете ANSYS. Получены эпюры напряжений и перемещений во фланцах. Сравнительный анализ результатов показал, что фланец из стеклопластика не уступает по прочности аналогичному фланцу, выполненному из стали.

Введение. В настоящее время развитию композитных материалов способствует разработка и применение в конструкциях волокнистых стеклопластиков, обладающих высокой удельной прочностью [1]. Благодаря применению композиционных материалов удается до-

биться высокой прочности при малом весе, высоких водоотталкивающих и антикоррозионных свойств, диэлектрической, химической и термической стойкости и других положительных эффектов.

Фланец – плоская деталь круглой или иной формы с отверстиями для болтов и шпилек, служащая для прочного и герметичного соединения труб, трубопроводной арматуры, присоединением труб друг к другу, к машинам, аппаратам и ёмкостям, для соединения валов и других вращающихся деталей (узлы длинных строительных конструкций, например, ферм, балок и др.). Данная деталь изготовлена из композиционных материалов без применения дополнительных клеевых или механических соединений [2]. В процессе формирования фланца с выступающей частью силовые слои композитной оболочки неоднократно сгибаются. Успешная реализация композиционных материалов при создании композитных деталей зависит от правильного выбора схемы армирования. Схема армирования выбирается на основе расчетов на прочность и жесткость. Для расчета фланца из стеклопластика следует учитывать неоднородность конструкции и анизотропию материала [3]. Разрушение фланца из стеклопластика начинается по механизму расслоения с потерей жесткости и изгибом детали.

Целью работы является расчет напряженно-деформированного состояния фланцев, выполненных из композиционного материала (стеклопластик) и стали. Задача решается расчета в пакетах Mathcad и Ansys.

Методика. Объектом исследования является фланец из стеклопластика и фланец из стали. Разработана 3D-модель фланца в программе SolidWorks. Фланец нагружается давлением в 4 МПа по нижней половине сквозного отверстия. Жесткостные характеристики стали 35: $E = 20000\frac{H}{мм^2}$; $\mu = 0{,}3$. Количество слоев детали из стеклопластика – 40, они разбиты на три пакета, отличающиеся углом укладки и числом слоев в пакете: первый пакет состоит из 10 слоев с углом укладки 0 градусов, второй – из 10 слоев с углом укладки 90 градусов, третий – из 20 слоев с углом укладки 45 градусов. Жесткостные характеристики многослойного пакета зависят от жесткостных характеристик отдельных слоев, определенной ориентации слоев и от соотношения толщины этих слоев и общей толщины пакета [4].

Жесткостные характеристики k-того слоя (монослоя) для расчета фланца из стеклопластика:

$$E_1 = 180000\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};\quad E_2 = 9000\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};\ G_{12} = 5150\frac{\text{Н}}{\text{мм}^2};\ \mu_{12} = 0{,}31;\ \mu_{21} = 0{,}016, \tag{1}$$

где E_1 и E_2 – модули упругости в направлениях осей координат монослоя 1 и 2, G_{12} – модуль сдвига, μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты Пуассона.

Определяем коэффициенты C_{ij} для каждого из трех пакетов по формулам:

$$\begin{cases} C_{11}^k = \lambda(E_1\cos^4\varphi + E_2\sin^4\varphi + \frac{1}{2}\mu_{12}E_2\sin^2 2\varphi) + G_{12}\sin^2 2\varphi; \\ C_{22}^k = \lambda(E_1\sin^4\varphi + E_2\cos^4\varphi + \frac{1}{2}\mu_{12}E_2\sin^2 2\varphi) + G_{12}\sin^2 2\varphi; \\ C_{12}^k = \lambda[(E_1 + E_2)\sin^2\varphi\cdot\cos^2\varphi + \mu_{12}E_2(\cos^4 2\varphi + \sin^4 2\varphi) - G_{12}\sin^2 2\varphi; \\ C_{26}^k = [\frac{\lambda}{2}(E_2\sin^2 2\varphi - E_1\cos^2 2\varphi + \mu_{12}E_2\cos 2\varphi) + G_{12}\cos 2\varphi]\sin 2\varphi; \\ C_{66}^k = \frac{\lambda\cdot\sin^2 2\varphi}{4}(E_1 + E_2 - 2\mu_{12}E_2) + G_{12}\cos^2 2\varphi, \end{cases} \tag{2}$$

где k – номер пакета, $\lambda = \frac{1}{1-\mu_{12}\mu_{21}}$, φ – угол укладки волокон.

Далее находим коэффициенты A_{ij} для всего композита по следующей формуле:

$$A_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{m} n_k \cdot C_{ij}^k, \tag{3}$$

где n – общее число слоев композиционного материала, m – общее число пакетов, n_k – число слоев в пакете.

Далее определяем жесткостные характеристики многослойного композита – E_x, E_y, G_{xy}, μ, μ_{xy} и μ_{yx}:

$$E_x = A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}}; \quad E_y = A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}; G_{xy} = A_{66};$$
$$\mu = \frac{A_{12}}{A_{11}}; \mu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}}; \mu_{yx} = \mu_{xy} \cdot \frac{E_y}{E_x}. \quad (4)$$

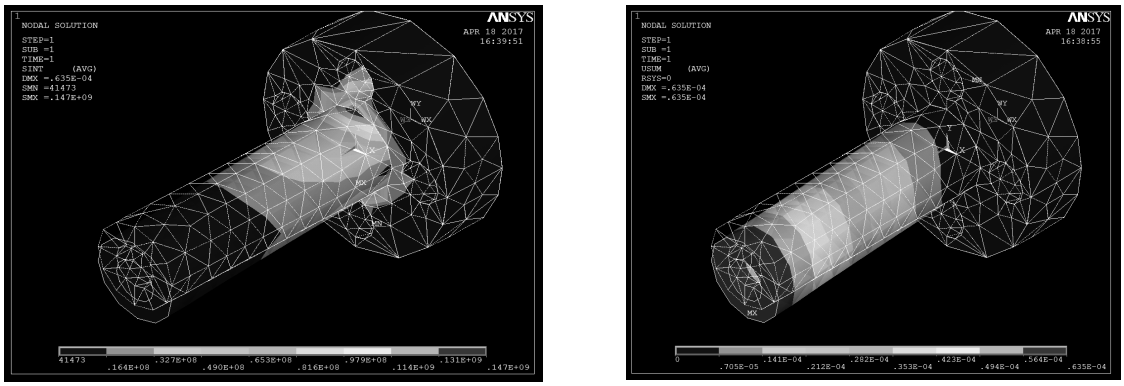
Результаты, полученные с помощью пакета Mathcad:

$$E_x = 66780\frac{H}{мм^2}; E_y = 66780\frac{H}{мм^2}; G_{xy} = 25610\frac{H}{мм^2}; \mu_{yx} = 0{,}322; \mu_{xy} = 0{,}322. \quad (5)$$

Проводим расчёт фланцев из стали и стеклопластика в системе Ansys [5]. На рисунках 1 и 2 представлены расчеты напряженно-деформированного состояния фланцев. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

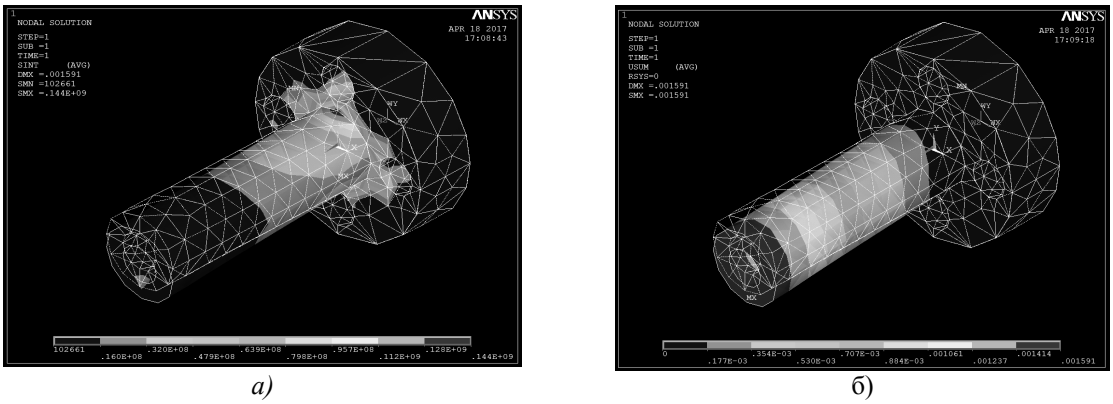
Таблица 1

Материал	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа
Сталь 35	0,0635	144
Стеклопластик	1,591	147



а) б)

Рис. 1. Эпюры напряжений (а) и перемещений (б) во фланце, изготовленном из стали 35



а) б)

Рис. 2. Эпюры напряжений (а) и перемещений (б) во фланце, изготовленном из стеклопластика

Выводы: В данной статье рассмотрено напряженно-деформированное состояние фланцев из композиционного материала и стали.

Из данного исследования можно сделать следующие выводы:

– деформирование фланца сопровождается значительным изгибом. У фланца, выполненного из стеклопластика, максимальная деформация составляет 1,6 мм, у стального – 0,06 мм;

– максимальная концентрация напряжений возникает в районе соединения трубки и основания фланца;

– фланец из стеклопластика не уступает по прочности аналогичному фланцу, выполненному из стали, но фланец из стеклопластика в 2,5 раза легче, чем фланец из стали.

Литература:

1. Бохоева Л.А. Исследование устойчивости пластин с дефектами в нелинейной постановке// Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2008. № 2. С. 22-27.
2. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А. Нестационарные процессы накопления повреждений композитных фланцев при циклических нагрузках// Механика композитных материалов. 1997. Т. 33. № 5. С. 636−643.
3. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
4. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
5. Бохоева Л.А., Дамдинов Т.А. Сравнительный анализ расчета разрушения слоистого материала аналитическим методом с полученными результатами в системе Ansys // Механики XXI веку. 2006. № 5. С. 200-202.

Calculation and evaluation of the strength of the composite flange

Bokhoeva L.A.[1,a], Bairov S.A.[1,b], Arapova I.A.[1,c], Kondratieva A.N.[1,d]

[1]East Siberia State University of Technology and Management, bldg. 1 40v Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation
[a]bohoeva@yandex.ru,[b]bairov.sofron@gmail.com, [c]iraarapowa@yandex.ru,[d]Lakki-4118@mail.ru

Keywords: flange, composite materials, deformable solids mechanics, mechanics of composite materials

The paper presents a calculation of the stress-strain state of flanges made of composite material (fiberglass) and steel. A 3D flange model is created in the SolidWorks program. To calculate the flange of fiberglass, account should be taken of the heterogeneity of the structure and the anisotropy of the material. With the help of the Mathcad package, the stiffness characteristics (Young's modules, shear modulus, Poisson's coefficients) are defined for a multilayer composite consisting of 40 layers, divided into three packets. These packets differ in the angle of fiber laying in the layers and in the number of layers in the package. The characteristics of the composite are determined from the known stiffness characteristics of the k-th layer. The task of calculating the strength of a multilayer flange construction is solved in an axisymmetric formulation using the finite element method in the ANSYS package. The diagrams of stresses and displacements in the flanges are obtained. A comparative analysis of the results showed that the fiberglass flange is not inferior in strength to a similar flange made of steel.

УДК 621.01: 621.81

Упрощенная модель слоистого упругого тела

Кожевников А.С.[a]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]kozhevnikovart@inbox.ru

Ключевые слова: топокомпозит, слоистое полупространство, слоистое упругое тело, эффективный модуль упругости, сферический индентор, контактные характеристики

Эквивалентная схема нагружения слоистого полупространства представлена как сумма частей однородных полупространств, жесткости которых соответствуют жесткостям покрытия и основания. С использованием жесткосной модели слоистого упругого тела, нагруженного осесимметричной распределенной нагрузкой, получено новое решение для определения его эффективного модуля упругости и эффективного коэффициента Пуассона в зависимости от упругих характеристик основного материала, материала покрытия и относительной толшины покрытия. Приведены выражения для эффективного модуля упругости и коэффициента Пуассона слоистого тела с двухслойным покрытием. Указаны случаи применения предложенной упрощенной модели слоистого упругого тела, как альтернативной и более простой, для определения относительной площади контакта и плотности зазоров в стыке при контактировании шероховатой повехности через слой покрытия при разных видах контакта.

Введение. Для повышения надежности уплотнительных соединений и узлов трения, работающих в экстремальных условиях, в настоящее время широко используются различные покрытия и модифицированные поверхностные слои на основе металлов, керамик, полимеров [1]. Тела с тонкими покрытиями было предложено называть топокомпозитами [2]. Опыт эксплуатации узлов трения и уплотнений с такими покрытиями показывает, что их уплотнительная способность и антифрикционные свойства определяется не только свойствами материала покрытия, но и его толщиной [3]. Известные рекомендации по выбору толщины покрытия основаны на экспериментальных данных, нередко противоречивых. В последнее время появились публикации по теории контактного взаимодействия шероховатых поверхностей через тонкие слои упругого [4–6], вязкоупругого [7] и упругопластического [8, 9] покрытий. Это позволит разработать надежные методы прогнозирования характеристик трения трибосопряжений и герметичности уплотнений и на стадии проектирования, что не требует проведения дорогостоящих и трудомких испытаний по определению работоспособности узлов трения и уплотнений.

Одним из направлений для решения этой проблемы является представление топокомпозита как конструкции с особыми механическими свойствами, зависящими от механических свойств основного материала и материала и толщины покрытия, предложенного в работах [10, 11]. В настоящей работе рассмотрим новое инженерное решение для определения эффективного модуля упругости топокомпозита (слоистого тела).

Состояние вопроса. Рассмотрим слоистое упругое тело (рис. 1), которое состоит из покрытия толщиной δ_1 с упругими характеристиками ν_1 и E_1, и основного материала с упругими характеристиками ν_0 и E_0, и нагружено осесимметричной нагрузкой. Точное решение этой задачи при осесимметричном нагружении приведено в [3, 12], однако оно трудоемко для инженерных расчетов. В работе [10] для этой цели предложено использовать теорию Герца. На основе достоверных результатов для крайних значений $\delta_1 = 0$ и $\delta_1 = \infty$ и с использованием двухточечной аппроксимации Паде, получено выражение для безразмерного упругогеометрического параметра, с помощью которого определяется упругая постоянная слоистого полупространства и все основные характеристики при его осесимметричном нагружении.

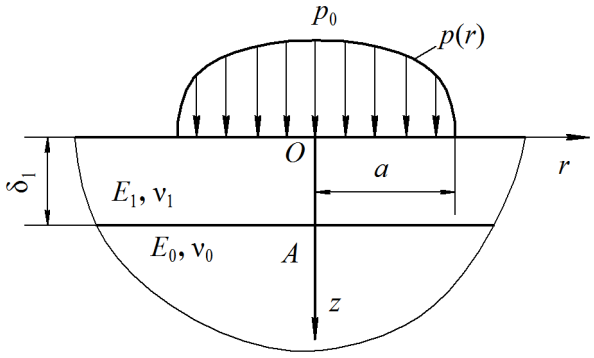


Рис. 1. Схема нагружения слоистого тела

Авторами [13, 14] на основании жесткостной модели определена упругая характеристика полупространства с однослойным покрытием для любых значений δ_1 при нагружении слоистого полупространства (рис. 1) нормальными напряжениями в круговой области:

$$p(r) = p_0\sqrt{1-r^2/a^2}\,, \quad 0 \le r \le a \tag{1}$$

В дальнейших работах [15, 16] рассмотрена нагрузка более общего вида:

$$p(r) = p_0\left(1-r^2/a^2\right)^{\beta}, \tag{2}$$

где $0 \le \beta \le 0{,}5$, $p_0 = p_m(1+\beta)$, $p_m = P/(\pi a^2)$ – среднее давление.

Следуя классическому подходу, основанному на применении потенциальных функций Буссинеску [17], для перемещения любой точки по оси симметрии внутрь однородного полупространства для случая его нагружения распределенной нагрузкой (1) определяются выражениями:

$$u_z = \frac{1+\nu}{2\pi E}\left[2(1-\nu)\psi - z\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}z}\right], \tag{3}$$

$$\psi = \iint\limits_s p(r)\frac{1}{R}r\mathrm{d}r\mathrm{d}\varphi\,, \; R = \sqrt{r^2+z^2}\,.$$

С учетом выражения (1) и того, что $\rho = r/a$ и $\bar{z} = z/a$,

$$\psi = 4p_0 a\int\limits_0^{\frac{\pi}{2}}\int\limits_0^1 \frac{\left(1-\rho^2\right)^{0.5}\rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\rho^2+\bar{z}}}\,. \tag{4}$$

После интегрирования имеем:

$$\psi = \frac{\pi p_0 a}{1+\beta}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\bar{z}^2}}\cdot{}_2F_1\left(\frac{1}{2},\,\frac{3}{2};\,\frac{5}{2};\,\frac{1}{1+\bar{z}^2}\right), \tag{5}$$

где ${}_2F_1(a,\,b;\,c;\,x)$ – гипергеометрическая функция Гаусса.

Подставляя выражение (5) в (3) получим:

$$u_z = \frac{p_m a}{E^*}K(\bar{z},\nu), \tag{6}$$

$$K(\bar{z},\nu) = \operatorname{arcctg}\bar{z} + \frac{\nu}{1-\nu}\bar{z}\left(1-\bar{z}\operatorname{arcctg}\bar{z}\right) \tag{7}$$

Упростим обозначения, приняв $K_i(0,\beta,\nu_i) = K_i(0)$, $K_i\left(\bar{\delta}_1,\beta,,\nu_i\right) = K_i\left(\bar{\delta}_1\right)$, $\bar{\delta}_1 = \delta_1/a$.

Для эффективного модуля упругости и коэффициента Пуассона топокомпозита в работах [12, 13] получено:

$$E_{01}^* = E_1^*\cdot F_1\,; \tag{8}$$

$$F_1 = K_1(0)\left[\frac{\left(K_1(0)-K_1\left(\bar{\delta}_1\right)\right)^2}{K_{01}(0)-K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right)} + K_1\left(\bar{\delta}\right)\frac{K_0\left(\bar{\delta}_1\right)}{K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right)}\cdot I_e\right]^{-1}; \tag{9}$$

$$\nu_{01} = \nu_1 + (\nu_0 - \nu_1)\frac{1 - F_1^{-1}}{1 - I_e}. \tag{10}$$

где $I_e = E_1^* / E_0^*$, $I_e = I\dfrac{1-\nu_0^2}{1-\nu_1^2}$, $I = E_1 / E_0$.

Аналогичный результат, с использованием жесткостной модели слоистого тела, получен при внедрении жесткого сферического индентора:

$$E_{01}^* = E_1^* \cdot F_{1R}; \tag{11}$$

$$F_{1R} = K_1(0)\left[\frac{\left(K_1(0) - K_1\left(\overline{\delta}_1\right)\right)^{\frac{5}{2}}}{\left(K_{01}(0) - K_{01}\left(\overline{\delta}_1\right)\right)^{\frac{3}{2}}} + K_1\left(\overline{\delta}\right)\left(\frac{K_0\left(\overline{\delta}_1\right)}{K_{01}\left(\overline{\delta}_1\right)}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot I_e\right]^{-1}; \tag{12}$$

$$\nu_{01} = \nu_1 + (\nu_0 - \nu_1)\frac{1 - F_{1R}^{-1}}{1 - I_e}. \tag{13}$$

Как показали расчеты повыражениям (9) и (12), полученные результаты при нагружения слоистого тела осесимметричной распределенной нагрузкой и при внедрения в него сферического индентора отличаются не более чем на 1%, поэтому в дальнейшем рекомендуется использовать F_1.

Предлагаемое новое решение. Выражения (8), (9) и аналогичные – (11), (12) получены с использованием жесткостной модели слоистого полупространства, представленной на рис. 2.

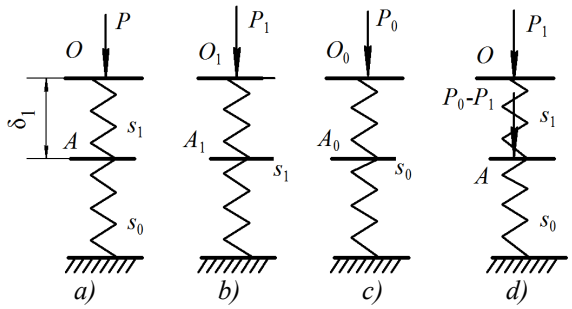


Рис. 2. Моделирование слоистого полупространства:
a) – исходная схема слоистого полупространства (рис. 1); *b*), *c*) – жесткостные схемы однородных полупространств; *d*) – эквивалентная схема нагружения слоистого полупространства

При выводе выражений (8) и (9) исползовалось условие о равенстве перемещений для однородных тел в точке *A* [15]. Сохраняя обозначения работы [15] рассмотрим иной подход.

Схему (рис.1) можно представить в виде рис.2, *a*. Тогда перемещения:

$$\omega_\delta = Ps_1, \qquad \omega_a = Ps_0, \qquad \omega_0 = P(s_1 + s_0),$$

где s_1, s_0 – жесткости слоя и основного материала, $P = \pi a^2 p_0 / (1 + \beta)$.

Рассмотрим два однородных полупространства с упругими характеристиками ν_1, E_1 и ν_0, E_0, нагруженные соответственно силами P_1 и P_0 (рис. 2, *b* и 2, *c*). Силы P_1 и P_0 и соответственно максимальные давления p_{01} и p_{00} выбираются из условия равенства перемещений:

$$\omega_\delta = \omega_1; \ \omega_a = \omega_0 .$$

Для схемы (рис. 2, *b*): $\omega_\delta = \omega_{O1} - \omega_{A1} = u_{zO1} - u_{zA1} = \dfrac{p_{01} a}{E_1^*}\left[K_1(0, \nu_1) - K_1\left(\overline{\delta}_1, \nu_1\right)\right]$

где $\overline{\delta}_1 = \delta_1 / a$.

Для схемы (рис. 2, *c*): $\omega_{A0} = u_{zA0} = \dfrac{p_{00} a}{E_0^*} K_0\left(\overline{\delta}_1\right)$.

Соответствующие жесткости: $\qquad s_1 = \dfrac{u_{zO1} - u_{zA1}}{P_1}$, $s_0 = \dfrac{u_{zA0}}{P_0}$. (14)

Для схемы (рис. 2*a*): $\omega_0 = \frac{P}{P_1}\left(u_{zO1} - u_{zA1}\right) + \frac{P}{P_0} u_{zA0}$.

Из эквивалентности схем нагружения на рис. 2*a* и 2*d* следует:

$$P = P_1 \frac{s_1}{s_1 + s_0} + P_0 \frac{s_0}{s_1 + s_0}, \tag{15}$$

или $p_0 = p_{01} \frac{s_1}{s_1 + s_0} + p_{00} \frac{s_0}{s_1 + s_0}$. (16)

Значение p_{01} определим из условий равенства сжатия покрытия толщиной δ_1 для слоистого тела под нагрузкой p_0 и однородного материала под нагрузкой p_{01}:

$$\frac{p_0 a}{E_{01}^*}\left[K_{01}(0) - K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right)\right] = \frac{p_{01} a}{E_1^*}\left[K_1(0) - K_1\left(\bar{\delta}_1\right)\right],\ p_{01} = \frac{E_1^*}{E_{01}^*} \frac{K_{01}(0) - K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right)}{K_1(0) - K_1\left(\bar{\delta}_1\right)} p_0. \tag{17}$$

Значение p_{00} определим из условия равенства перемещений при $z = \delta_1$ слоистого тела под нагрузкой p_0 и однородного материала при $z = \delta_1$ под нагрузкой p_{00}:

$$\frac{p_0 a}{E_{01}^*} K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right) = \frac{p_{00} a}{E_0^*} K_0\left(\bar{\delta}_1\right),\ p_{00} = \frac{E_0^*}{E_{01}^*} \frac{K_{01}\left(\bar{\delta}_1\right)}{K_0\left(\bar{\delta}_1\right)} p_0. \tag{18}$$

С учетом (6) выражения (14) представим в виде:

$$s_1 = \frac{3}{2\pi a E_1^*}\left[K_1(0) - K_1\left(\bar{\delta}_1\right)\right],\ s_0 = \frac{3}{2\pi a E_0^*} K_0\left(\bar{\delta}_1\right). \tag{19}$$

Подставляя выражения (17) – (19) в (16) получим:

$$E_{01}^* = E_1^* \cdot \frac{K_{01}(0)}{K_1(0) - K_1\left(\bar{\delta}_1\right) + K_0\left(\bar{\delta}_1\right) I_e}. \tag{20}$$

Следовательно, по аналогии с выражениями (9) и (10) имеем:

$$F_{1n} = \frac{K_{01}(0)}{K_1(0) - K_1\left(\bar{\delta}_1\right) + K_0\left(\bar{\delta}_1\right) \cdot I_e}. \tag{21}$$

Для коэффициента Пуассона следует использовать выражение (10).

Сравнение зависимостей $F_1\left(\bar{\delta}_1\right)$ и $F_{1n}\left(\bar{\delta}_1\right)$ по выражениям (9) и (21) соответственно, полученных при нагружении слоистого тела осесимметричной распределенной нагрузкой представленно на рис. 3.

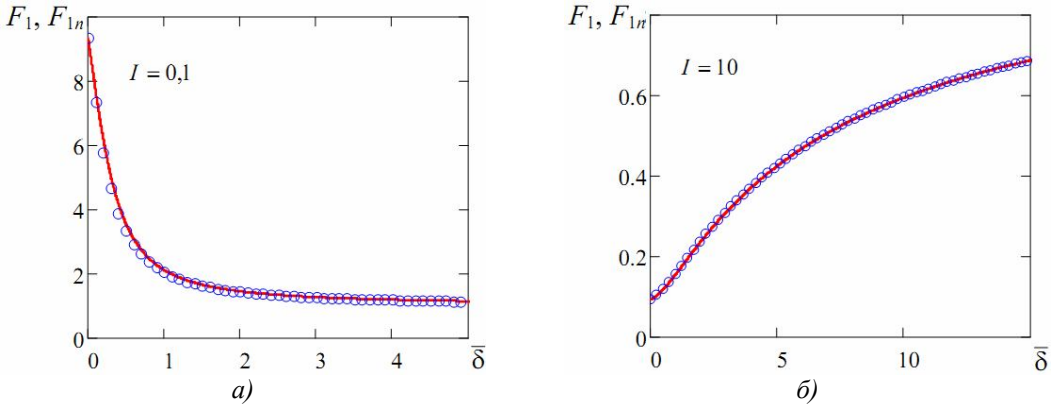


Рис. 3. Сравнение зависимостей $F_1\left(\bar{\delta}_1\right)$ и $F_{1n}\left(\bar{\delta}_1\right)$:
линии соответствуют выражению (9), точки – выражению (21)

В дальнейшем используем $F_1\left(\bar{\delta}_1\right) = F_{1n}\left(\bar{\delta}_1\right)$.

Для двухслойного покрытия: $E_{02}^* = E_2^* \cdot F_2$, (22)

$$F_2 = \frac{K_{02}(0)}{K_2(0) - K_2\left(\bar{\delta}_2\right) + K_{01}\left(\bar{\delta}_2\right) \cdot E_2^* / E_{01}^*}, \tag{23}$$

$$\mu_{02} = \mu_2 + (\mu_{01} - \mu_2)\frac{1 - F_{02}^{-1}}{1 - E_2^*/E_{01}^*}. \quad (24)$$

Для случая контакта гладкой жесткой сферы со слоистым полупространством сближение тел, радиус контакта и максимальное давление определяются выражениями:

$$w_{01} = w_1 \cdot F_1^{-\frac{2}{3}},\ a_{01} = a_1 F_1^{-\frac{1}{3}},\ p_{01} = p_0 F_1^{\frac{2}{3}}. \quad (25)$$

При контактировании шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством для отдельной неровности параметр $\bar{\delta}_{1i}$ можно представить в виде:

$$\bar{\delta}_i = \frac{\delta}{a_r} = \frac{\delta}{a_c} \cdot \frac{a_c}{a_r} = \gamma \cdot \eta_i^{-0.5}, \quad (26)$$

где $\gamma = \delta_1 / a_c$ – относительная толщина покрытия; $\eta_i = a_r^2 / a_c^2$ – относительная площадь контакта для отдельной неровности; a_c – радиус площадки, приходящийся на одну неровность (параметр дискретной модели шероховатости).

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражениям (20) и (25) имеем:

$$E_{01}^*(\gamma, \varepsilon, u) = E_1^* \cdot F_{1i}(\gamma, \varepsilon, u); \quad (27)$$

$$\eta_i(\gamma, \varepsilon, u) = \eta_{1i}(\varepsilon, u) \cdot F_{1i}^{-\frac{2}{3}}(\gamma, \varepsilon, u); \quad (28)$$

где $F_{1i}(\gamma, \eta_i)$ определяется выражением (21) с учетом (10).

Такой подход является альтернативным и более простым при определении относительнщй площади контакта при взаимодействии жесткой шероховатой поверхности через слой упругого покрытия [4-6], вязкоупругого [7] и упругопластического [8, 9], а также плотности зазоров при упругом [19, 20] и упругопластическом контактах [21, 22].

Заключение.

1. Аналитически определена зависимость перемещения любой точки по оси симметрии внутрь однородного полупространства для случая его нагружения распределенной нагрузкой вида (1) от величины нагрузки, которая положена в основу жесткостной модели слоистого упругого тела.

2. С использованием жесткостной модели слоистого тела предложено новое решение для эффективного модуля упругости для любых значений толщины покрытия, описываемое более простым выражением. При его получении отсутствует условие о равенстве перемещений для однородных тел в точке *A* [15, 18].

3. Предложенный подход позволяет определить эффективный модуль упругости и коэффициент Пуассона слоистого упругого тела с двухслойным покрытием.

4. При использовании представленных результатов для описания контактирования жесткой шероховатой поверхности со слоистым полупространством следует учитывать, что каждой контактирующей неровности соответствует свой эффективный модуль упругости.

5. Представленные результаты можно использовать при разных видах контакта жесткой шероховатой поверхности через слой покрытия.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания на выполнение НИР № 2014/10 на 2016 г. (проект № 1754).

Литература:

1. Ковалев Е.П., Игнатьев М.Б., Семенов А.П., Смирнов Н.И., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор) // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 3. С. 316-336.

2. Воронин Н.А. Топокомпозиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения Ч. 1 // Трение и износ. 1999. Т. 20. № 3. С. 313-320.

3. Макушкин А.П. Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах М.: Машиностроение, 1993. 288 с.

4. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. Контакт шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2006. № 2. С. 302-307.

5. Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Влияние толщины покрытия на относительную площадь контакта сопряжений деталей машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. №2. С. 13-15.

6. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. The influence of coating thickness on the relative area of triounits contact // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1061-1062. С. 614-618.

7. Огар П.М., Беляева О.В., Алпатов Ю.Н. Контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством через слой вязкоупругого покрытия // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2(10). С. 10-14.

8. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контактирование жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.

9. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние толщины упругопластического покрытия на относительную площадь контакта // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4. С. 14-17.

10. Воронин Н.А. Применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 2. С. 250-258.

11. Воронин Н.А. Особенности и прикладной аспект механики контактного взаимодействия жесткого сферического штампа с упругопластичным слоистым полупространством // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2006. № 2. С. 32-55.

12. Макушкин А.П. Исследование напряжённо-деформированного состояния полимерного слоя при внедрении в него сферического индентора // Трение и износ.1984. Т. 5. № 2. С. 823- 832.

13. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2006. № 2. С. 297-302.

14. Огар П.М, Ключев Е.А., Максимова О.В. Инженерная методика определения упругих характеристик топокомпозитов // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 19-22.

15. Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Управление жесткостью контактных систем уплотнительных соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 22-27.

16. Ogar P.M., Tarasov V.A. Determination of the Elastic Characteristics of Bodies with Thin Coatings // Advanced Materials Research Vol. 677 (2013) pp. 267-272.

17. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

18. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Определение эффективного модуля упругости топокомпозита // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. № 1. С. 167-173.

19. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Плотность зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2015. 1(25). С. 60-65.

20. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Плотность зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4(48). С. 74-79.

21. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Герметичность уплотнительных соединений с тонкослойными упругими покрытиями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3(47). С. 34-40.

22. Алпатов Ю.Н., Кожевников А.С. Герметичность уплотнительных соединений с упругопластическим покрытием // Системы. Методы. Технологии. 2015. 4(28). С. 29-35.

A simplified model of layered elastic body

Kozhevnikov A.S.[a]

Bratsk State University, Makarenko st. 40, Bratsk, Russia
[a]kozhevnikovart@inbox.ru

Key words: topocomposite, layered half-space, layered elastic body, effective modulus of elasticity, spherical indenter, contact characteristics

The equivalent loading scheme of a layered half-space is represented as the sum of parts of homogeneous half-spaces, the rigidity of which corresponds to the rigidities of the coating and the base. Using a rigid model of a layered elastic body loaded with an axially symmetric distributed load, a new solution is obtained for determining its effective modulus of elasticity and the effective Poisson's ratio, depending on the elastic characteristics of the base material, the coating material and the relative thickness of the coating. The expressions are given for the effective elastic modulus and the Poisson's ratio of a two-layered layered body. The cases of application of the proposed simplified model of a layered elastic body as an alternative and simpler one for determining the relative contact area and the gap density in the joint are described during contacting the rough surface through the coating layer for different types of contact.

УДК 621.793.71

Влияние добавки ниобия на структуру самофлюсующихся плазменных покрытий

Гнидан К.А.[1a], Тютюнькова М.К.[1b], Безрукова В.А.[1c]

[1]Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия
[a]g.k.a@inbox.ru, [b]mystery22@inbox.ru, [c]vikabezrukova1995@mail.ru

Ключевые слова: плазменное напыление, оплавление, легирование, самофлюсующийся материал, Ni-Cr-Si-B

В данной работе исследована микроструктура покрытий, полученных воздушно-плазменным напылением из смеси порошков на основе никеля марки ПР-Н77Х15С3Р2 (98 мас. % ПР-Н77Х15С3Р2 + 2 мас. % Nb и 96 мас. % ПР-Н77Х15С3Р2 + 4 мас. % Nb) после оплавления плазменной струёй. Проведен сравнительный анализ микроструктуры покрытия до и после легирования. Рассчитаны значения энергии Гиббса основных фаз в покрытии при Т=1400 К, установлены наиболее вероятные соединения, результаты подтверждены микроструктурными исследованиями. Изменения уровня микротвердости не наблюдается: Средняя микротвердость исходных покрытий без легирования и дополнительно легированных покрытий совпадает. Отмечено положительное влияние легирования и оплавления на структуру полученных покрытий, замечено уменьшение размеров и объемной доли хрупких фаз.

Введение. Нефтяная и угольная промышленность, машиностроение, авиастроение, судостроение, энергетика и многие другие отрасли промышленности нуждаются в материалах, обладающих комплексом высоких свойств. Многие из существующих промышленных материалов уже не могут удовлетворить этим требованиям. Чаще всего получение материала с комплексом таких свойств, связано с высокими затратами и трудностью обработки поверхности деталей, поэтому изготавливать делать целиком из такого материала нецелесообразно. Одним из эффективных решений данной проблемы является формирование износостойких покрытий на стальных изделиях. Известно, что сплавы системы Ni-Cr-Si-B, широко распространены в технологиях напыления и характеризуются высокой твердостью и износостойкостью [1-5], а также коррозионной стойкостью [3, 5, 6].

Основными способами нанесения покрытий из самофлюсующихся сплавов являются технологии напыления [1, 3, 4, 6, 8, 10-12] и наплавки [2, 7, 9]. Высокие скорости охлаждения, свойственные этим способам, приводят к формированию значительных остаточных напряжений в покрытиях, что, в свою очередь, способствует снижению трещиностойкости [5]. Кроме того, в работе [13] показано, что трещины зарождаются и легко распространяются по грубым и хрупким включениям боридов и карбидов хрома (CrB, Cr_5B_3, Cr_7C_3), которые всегда присутствуют в покрытиях системы Ni-Cr-Si-B. К сожалению, решить проблему низкой трещиностойкости, изменяя только технологические режимы, не удается. Наиболее эффективным способом, в данном случае, является изменение структуры самофлюсующихся покрытий за счет легирования, что позволит снизить количество хрупких фаз.

На сегодняшний день выполнено значительное количество работ по легированию покрытий из самофлюсующихся сплавов, полученных лазерной наплавкой. В работах [10, 11] показано, что при легировании танталом формируется карбид тантала (TaC), который способствует уменьшению количества С в расплаве и карбид хрома (Cr_7C_3) не выделяется. Добавка оксида ванадия (V_2O_5) позволяет сформировать бориды ванадия (VB, VB_2, V_2B_3 и V_3B_4), вместо хрупких боридов хрома (CrB_2 и CrB) [5]. Кроме того, образование боридов ванадия является основной причиной измельчения микроструктуры, что снижает восприимчивость к растрескиванию. В работе [12] показано, что измельчения частиц борида хрома CrB при лазерной наплавке можно достичь легированием до 10 вес. % Nb.

Стоит отметить, что в литературе практически не встречается данных о легировании покрытий выбранной системы, полученных плазменным напылением, таким образом, целью

данной работы является исследование структурных особенностей плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-B, дополнительно легированных ниобием.

Методика экспериментального исследования. В качестве материала для нанесения покрытий использовали самофлюсующийся порошок на основе никеля (мас. %, основа – Ni, 0,4C, 15Cr, 2Si, 2B, 3Fe), размерами 40…100 мкм и порошок ниобия (мас. %, 93,6Nb; 6,4Ta), размерами 5…10 мкм.

Смеси порошков (98 мас. % ПР-Н77Х15С3Р2 + 2 мас. % Nb и 96 мас. % ПР-Н77Х15С3Р2 + 4 мас. % Nb) получали перемешиванием исходных компонентов в стальном стакане объёмом 250 мл в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6. В качестве мелющих тел использовали стальные шары диаметром 10 мм. Соотношение масс шаров и порошковой смеси было равным 3:1.

Режимы перемешивания: время измельчения – 30 мин., частота вращения опорного диска – 100 мин$^{-1}$. Порошок указанного состава напыляли на трубы из низкоуглеродистой стали 20 с внутренним диаметром 25 мм и толщиной стенки 3 мм. Напыление покрытий проводили в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН на установке плазменного напыления порошковых материалов «Термоплазма 50-01» с кольцевым вводом порошка. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа использовали воздух, в качестве защитного – смесь воздуха и пропан-бутана. Режимы напыления: сила тока – 140 А, напряжение – 265 В, дистанция напыления – 170 мм. Непосредственно перед напылением поверхность труб подвергали пескоструйной обработке.

Образцы с покрытиями оплавляли высококонцентрированным источником нагрева (плазменная струя).

Для проведения металлографических исследований использовали оптический микроскоп Carl Zeiss AxioObserver A1m и растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO 50 XVP с микроанализатором EDS X-Act. Образцами для структурных исследований выступали поперечные микрошлифы, запрессованные в полимерную матрицу и подготовленные по стандартной методике (шлифование абразивными бумагами и полирование суспензией, содержащей частицы оксида хрома). Для травления микроструктуры покрытий использовали раствор, состоящий из 10 мл HCl, 0.1 мл HNO_3 и 10 г $FeCl_3$. Микротвердость структурных составляющих в покрытиях оценивали на приборе Wolpert Group 402MVD при нагрузке 25 г.

Результаты и обсуждение. Структура плазменных покрытий до оплавления с добавкой ниобия была исследована ранее [14]. Покрытие до оплавления в основном состоит из частиц самофлюсующегося порошка, которые были расплавлены в плазменной струе, а также пластически деформированных и нерасплавленных (исходных) частиц. По границам самофлюсующихся частиц наблюдаются темно-серые включения борида ниобия (NbB_2) и светло-серые вытянутые включения, обогащенные танталом. Согласно данным микроструктурного анализа, указанные включения неравномерно распределены по материалу покрытий. Для получения более однородной структуры покрытий решено было провести последующее оплавление покрытий.

Как было отмечено выше, материал покрытия представляет собой систему, состоящую, как минимум, из шести химических элементов (Ni, Cr, Si, B, C, Nb). Согласно анализу двойных и тройных диаграмм состояния указанных химических элементов, в покрытиях после оплавления возможно выделение большого количества различных химических соединений. Для уточнения наиболее вероятных соединений этой системы были проведены расчеты энергий Гиббса.

Основной задачей, которая ставилась в настоящей работе, является измельчение хрупких боридов хрома (CrB) и уменьшение его объемной доли. В работе [15] показано, что эффективным решением этой задачи является добавка химического элемента, который имеет более высокое сродство к бору или углероду, чем хром. Или, другими словами, энергия Гиббса боридов или карбидов этого элемента должна быть более отрицательной, чем энергия Гиббса CrB.

Значения энергии Гиббса для различных химических соединений приведены в таблице. Энергии Гиббса «на металл» (ниобий или хром) и «не металл» (бор или углерод) для соединений типа MxHy были рассчитаны по следующей формуле:

$$\Delta G(1400\,K) = \frac{\Delta G(1400\,K)}{x},$$

где x – индекс в формуле MxHy, для неметалла рассчитывается аналогично, подставляя вместо x значение y.

Таблица

Значение энергии Гиббса, кДж/моль для карбидов и боридов при 1400 К

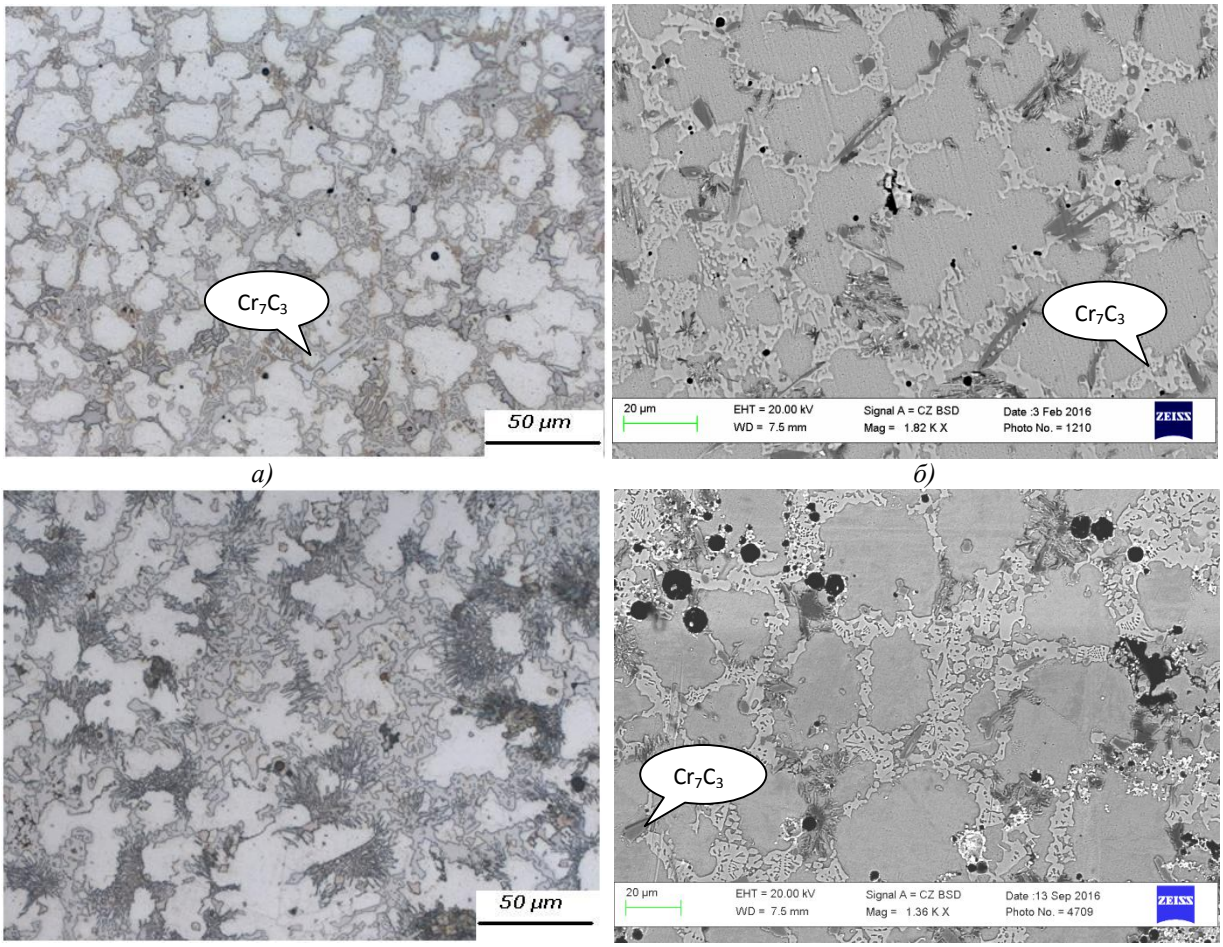
На все соединение	«На металл»	«На неметалл»
NbC		
-134,07	-134,07	-134,07
Nb_2C		
-88,82	-44,41	-88,82
Cr_3C_2		
-116,62	-38,87	-58,31
Cr_7C_3		
-252,97	-36,14	-84,32
$Cr_{23}C_6$		
-684,98	-29,78	-114,16
CrB_2		
-114	-114	-57
CrB		
-82,33	-82,33	-82,33

Полученные данные позволяют предположить, что при добавке ниобия к материалу системы Ni-Cr-Si-B-C более вероятным будет образование карбида ниобия (NbC), чем боридов хрома (CrB_2 и CrB) и карбидов хрома (Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$). Видно, что образование карбида хрома Cr_7C_3 более вероятно, чем $Cr_{23}C_6$, что подтверждается также данными работы [14], где были обнаружены грубые включения свободной формы Cr_7C_3, а не шестигранные призмы $Cr_{23}C_6$. Значений энергии Гиббса для боридов ниобия в литературе найти не удалось. Можно предположить, что, по аналогии с карбидами ниобия, энергия Гиббса боридов ниобия будет выше, чем энергия Гиббса боридов хрома.

Теоретические расчеты были подтверждены структурными исследованиями. Изображение структуры плазменных покрытий с 2 и 4 % мас. Nb после оплавления плазменной струей представлено на рисунке 2. Видно, что структура покрытий практически одинакова. В результате структурных и фазовых исследований было выявлено, что покрытия состоят из дендритов твердого раствора γ-Ni, междендритное пространство заполнено эвтектикой Ni-Ni_3B [17, 18]. Карбид хрома (Cr_7C_3) выделяется в виде грубых включений свободной формы.

Ранее было показано, что в покрытиях без добавки Nb после оплавления, бориды хрома (CrB) формируются либо в виде достаточно крупных ромбических включений, либо в виде грубой эвтектики (γ-Ni)-CrB [18]. Бориды хрома в покрытиях с 2 мас. % Nb представляют собой тонкие пластины, растущие от частиц NbC (рис. 1). Повышение количества ниобия до 4 мас. % способствует увеличению объемной доли включений NbC. В результате структурных исследований было выявлено, что это приводит к увеличению объемной доли боридов хрома. При этом толщина боридных пластин в покрытиях с 4 мас. % Nb меньше, чем в покрытиях с 2 % Nb (рис. 2).

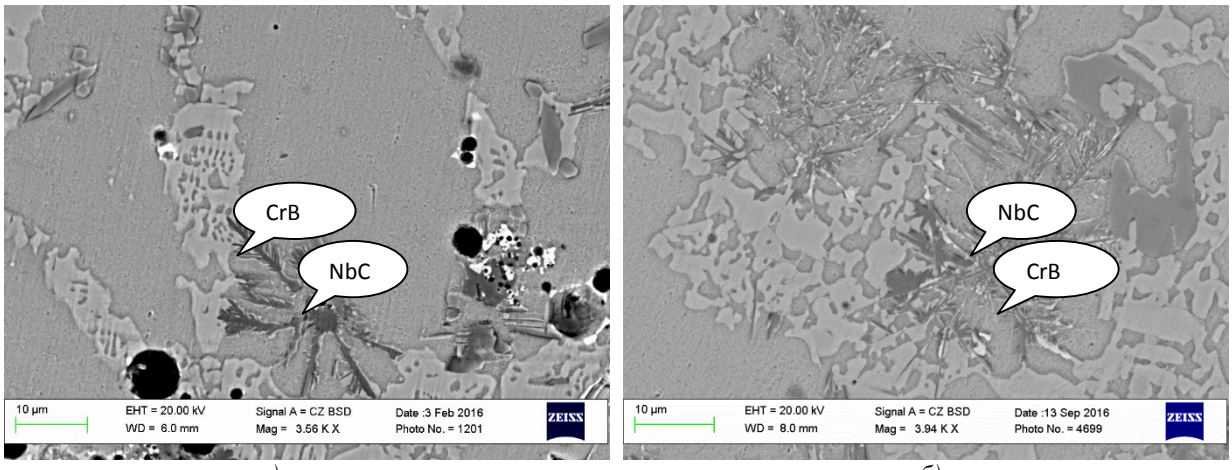
Средняя микротвердость полученных покрытий около 842 HV_{25}, что соответствует микротвердости самофлюсующихся покрытий без ниобия.



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 1. Микроструктура плазменных покрытий после оплавления:
а, б – с добавкой 2 мас. % Nb; *в, г* – 4 мас. % Nb



а) *б)*

Рис. 2. Микроструктура плазменных покрытий после оплавления
а - 2 мас. % Nb; *б* - 4 мас. % Nb

Выводы:

1. Были проведены расчеты и сравнение энергий Гиббса основных фаз покрытия, в результате чего установлены наиболее вероятные фазы в покрытии.
2. Расчеты были подтверждены микроструктурными исследованиями.
3. Результаты исследований свидетельствуют о преимуществах плазменного напыления самофлюсующихся сплавов с Nb в качестве легирующей добавки, так как происходит измельчение и уменьшение количества хрупких включений.
4. Использование данного легирующего элемента позволяет сформировать покрытия с твердыми армирующими частицами.

Литература:

1. Chaliampalias D., Vourlias G., Pavlidou E., Skolianos S., Chrissafis K., Stergioudis G. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255. – P. 3605–3612.
2. Sudha C., Shankar P., Rao R.V. S., Thirumurugesan R., Vijayalakshmi M., Raj B. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. P. 2103–2112.
3. Gonzalez R., Garcıa M.A., Penuelas I., Cadenas M., Fernandez Ma. del Rocıo, Battez A. Hernandez, Felgueroso D. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes // Wear. – 2007. – Vol. 263. – P. 619–624.
4. Zhang X. C., Xu B.S., Tu S.T., Xuan F.Z., Zhang Y.K., Wang H.D., Wu Y.X. Rolling contact fatigue mechanism of a plasma-sprayed and laser-remelted Ni alloy coating // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2009. – Vol. 32. – P. 84–96.
5. Wang D., Liang E., Chao M., Yuan B. Investigation on the microstructure and cracking susceptibility of laser-clad V2O5/NiCrBSiC alloy coatings // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 1371–1378.
6. Zhao W., Wang Y., Dong L., Wu K., Xue J. Corrosion mechanism of NiCrBSi coatings deposited by HVOF // Surface & Coatings Technology. – 2005. – Vol. 190. – P. 293–298.
7. Guoqing C., Xuesong F., Yanhui W., Wenlong Z. Microstructure and wear properties of nickel-based surfacing deposited by plasma transferred arc welding // Surface & Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228. – P. 276–282.
8. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. An investigation of the mechanical properties and wear resistance of NiCrBSi coatings carried out by in situ laser remelting // Wear. – 2011. – Vol. 270. – P. 640–649.
9. Li R., Li Z., Huanga J., Zhanga P., Zhua Y. Effect of Ni-to-Fe ratio on structure and properties of Ni–Fe–B–Si–Nb coatings fabricated by laser processing // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – P. 3554–3557.
10. Xiang H., Xu Y.D., Zhang L.T. Synthesis and microstructure of tantalum carbide and carbon composite by liquid precursor route // Scripta Materialia. – 2006. – Vol. 55. – P. 339–342.
11. Chao M.J., Wang W.L., Liang, D.X E.J. Ouyang Microstructure and wear behavior of laser clad NiCrBSi+Ta composite coating // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 1918–1922.
12. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Advances in laser surface engineering: tackling the cracking problem in laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C alloys // JOM. – 2013. – Vol. 65 (6). – P. 741–748.
13. Hemmati I., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 302–311.
14. Корниенко Е.Е., Гнидан К.А. Структурные особенности плазменных покрытий системы Ni-Cr-Si-B, дополнительно легированных Nb // Актуальные проблемы в машиностроении = Actual problems in machine building: материалы III междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 30 марта 2016 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – №3. – С. 461-467.
15. Hemmati I., Huizenga R.M., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Microstructural design of hardfacing Ni–Cr–B–Si–C alloys // Acta Materialia. – 2013. – Vol. 61. – P. 6061–6070.
16. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений спр. / ред. Т. Я. Косолапова. - М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
17. Гнидан К.А. Структурные исследования плазменных покрытий Ni-Cr-Si-B/Nb после оплавления // Материалы 2-ой Международной Российско-Казахстанской научно-практической школы-конференции «Химические технологии функциональных материалов», г. Алматы, 26-27 мая 2016 г. – С.78-80.
18. Корниенко Е.Е., Никулина А.А., Баннов А.Г., Кузьмин В.И., Мильдебрах М., Безрукова В.А., Жойдик А.А. Влияние температуры оплавления на структуру и свойства самофлюсующихсяпокрытий на основе никеля // Обработка металлов (технология, оборудование и инструменты). – 2016. - № 4 (73). – С. 52-62.

Effect of niobium additive on the structure of self-fluxing plasma coatings

Gnidan K.A.[1a], Tyutyunkova M.K.[1b], Bezrukova V.A.[1c]

[1]Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]g.k.a@inbox.ru, [b]mystery22@inbox.ru, [c]vikabezrukova1995@mail.ru

Keywords: plasma spraying; alloying, self-fluxing material, Ni-Cr-Si-B

In this article the structure of coatings obtained by air-plasma spraying from the mixture of powders Ni77Cr15B2Si3 + 2 and 4 wt. % Nb after flowing by a plasma jet was investigated. A comparative analysis of the microstructure of the coatings before and after alloying is carried out. The Gibbs' energy values of the main phases in the coating at T = 1400 K are calculated. The most probable compounds are established. The results are confirmed by microstructural studies. The microhardness value change is not observed. The average microhardness of the initial coating without alloying and additionally alloying coatings is the same. It was noted a positive effect of alloying and flowing on the structure of the coatings. It is shown that the sizes and volume fraction of the brittle phase is decreased.

УДК 621.01; 621.81; 621.646

Математическая модель шероховатой поверхности для решения задач герметологии

Горохов Д.Б.[a], Кожевников А.С.[b], Угрюмова Е.В.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]denis_gorohov@mail.ru, [b]kozhevnikovart@inbox.ru, [c]weblab@brstu.ru

Ключевые слова: шероховатая поверхность, параметры шероховатости, опорная кривая профиля, параметры опорной кривой, бета-функция, распределение вершин неровностей, распределение высот неровностей, относительная площадь контакта, плотность зазоров в стыке

Приведены основы моделирования шероховатых поверхностей уплотнительных стыков, характерной особенностью которых является превышение приложенного контактного давления в сравнении с узлами трения на 1…2 порядка. Шероховатая поверхность представлена совокупностью отдельных неровностей самоподобной формы и случайных размеров, распределение вершин и впадин которых описываются двухмерной функцией. Для описания опорной кривой поверхности использовано отношение бета-функции. Определены соотношения между параметрами α и β при описании опорной кривой профиля отношение опорной кривой профиляю в зависимости от параметровм бета-функции, и параметрами v и b – при описании опорной кривой параболой. Задача моделирования шероховатой поверхности представлена как определение функции распределения неровностей по высоте в зависимости от параметров опорной кривой профиля. Приведены примеры использования предложенных моделей для решения задач герметологии при разных видах контакта шероховатых поверхностей.

Введение. Основы теории контактного взаимодействия шероховатых поверхностей заложены Н.Б. Демкиным. Им впервые было предложено моделировать шероховатую поверхность набором тел правильной геометрической формы, для которых известны решения контактных задач [1]. При этом была определена связь кривой опорной поверхности с распределением вершин выступов по высоте. Так как в большинстве случаях при трении в контакте участвуют наиболее высокие выступы, то для исследования контактных деформаций была использована начальная часть опорной поверхности, которая описывается параболой.

Однако, как указано в [2], отличительной характеристикой уплотнительного стыка неподвижных соединений является величина контактного давления, превышающая аналогичное в узлах трения на 1…2 порядка, что вносит определенные коррективы для решения задач герметологии.

1. О подходах к описанию шероховатой поверхности

Микрогеометрия уплотнительных поверхностей является одним из важнейших факторов, определяющих герметичность и долговечность неподвижных уплотнительных соединений. В этой связи задача моделирования топографии весьма актуальна и ее эффективное решение позволяет более точно описать процесс контактного взаимодействия щероховатых поверхностей.

Уплотнительная поверхность является весьма сложным объектом по набору составляющих элементов, их иерархии и взаимному расположению. Отклонение реальной поверхности от идеально гладкой связано с воздействием на тело различных независимых факторов. Поэтому можно представить поверхность как совокупность неровностей четырех размерных уровней: макроотклонений, волнистости; шероховатости и субшероховатости. При этом нет каких-либо ограничений на размерные диапазоны неровностей и не существует всесторонне обоснованного критерия разделения неровностей по масштабу [3]. В качестве условного критерия используют отношение шага и высоты неровности S_i / H_i. Критерии неровностей смежных уровней различаются на порядок и более.

Для модельного представления, принятого в трибомеханике, используют разные подходы — от детерминистского до статистического и фрактального [4]. Каждый из них имеет

достоинства и недостатки, поэтому правильный выбор метода описания поверхности во многом зависит от решения конкретной задачи.

В настоящей статье основное внимание будет уделено неровностям уровня шероховатости, которые характеризуются некоторыми особенностями:

1. Поскольку контактное давление $\overline{q_i}$ необходимое для полного деформирования неровности $i-$*го* уровня, при упругом контакте пропорционально $\left(S_i / H_i\right)^{-1}$, т.е.

$$\overline{q}_i\Theta \sim \left(S_i / H_i\right)^{-1},$$

где Θ — упругая постоянная, то во многих случаях для тяжело нагруженного контакта, когда $q_c > q_i$, макроотклонения и волнистость будут деформированы полностью. Для шероховатости, как показано в работе [5], $\overline{q}\Theta \to \infty$.

2. В конкретных случаях, когда необходимо учитывать макроотклонения и волнистость, могут быть успешно использованы детерминистские или другие модели, для которых имеются решения контактных задач [6–9 и др.].

3. В отличие от уровней макроотклонений и волнистости, для которых характерен только упругий контакт, для неровностей уровня шероховатости возможны разные виды контакта, причем одновременно.

4. Параметры шероховатости в большей мере стандартизированы.

5. Нижеприведенная модель шероховатости может быть использована для описания неровностей других уровней, а двухуровневый подход может быть реализован согласно работе [4].

Структурная организация и морфологическое строение неровностей шероховатой поверхности описаны в работе [10].

2. Описание опорных кривых профиля параболой и отношением бета-функции

Дискретная модель контактирования шероховатых поверхностей, разработанная И.В. Крагельским и Н.Б. Демкиным, базируется на описании начальной части опорной кривой профиля шероховатой поверхности параболой:

$$t_p = \eta(\varepsilon) = b\varepsilon^{\nu}, \qquad (1)$$

где ν и b – константы; $\varepsilon = y / R_{\max}$ – относительное расстояние от линии выступов; y – расстояние от линии выступов до рассматриваемого уровня; $R_{\max}$ – максимальная высота неровностей.

Так как параллельные профили шероховатой поверхности обладают свойством эргодичности, то опорная площадь шероховатой поверхности $\eta(\varepsilon)$ совпадает с опорной кривой профиля $t_p(\varepsilon)$. Поэтому для определения функции распределения неровностей используется выражение (1).

Впоследствии Н.Б Демкиным [11] было предложено для описания опорной кривой всего профиля, а не только его начальной части, использовать отношение неполной бета-функции:

$$t_p(\varepsilon) = I_{\varepsilon}(\alpha,\beta) = \frac{\mathrm{B}_{\varepsilon}(\alpha,\beta)}{\mathrm{B}(\alpha,\beta)}, \qquad (2)$$

где: $\alpha = \left(\frac{R_p}{R_q}\right)^2 \left(\frac{R_{\max} - R_p}{R_{\max}}\right) - \frac{R_p}{R_{\max}}, \qquad \beta = \alpha\left(\frac{R_{\max}}{R_p} - 1\right).$ (2а)

$\mathrm{B}_{\varepsilon}(\alpha,\beta)$ и $\mathrm{B}(\alpha,\beta)$ – неполная и полная бета-функции; R_p – глубина сглаживания профиля; R_q – среднеквадратическое отклонение профиля.

Для анализа результатов, полученных с использованием разных опорных кривых, важно знать соотношения между параметрами α и β при описании опорной кривой профиля отношением бета-функции, и параметрами ν и b – при описании опорной кривой параболой, которые определяется следующими выражениями [12]:

$$\nu = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p \mathrm{B}_{\varepsilon_\nu}(\alpha,\beta) - \mathrm{B}_{\varepsilon_\nu}(\alpha+1,\beta)} - 1,\ b = \frac{\mathrm{B}_{\varepsilon_\nu}(\alpha,\beta)}{\mathrm{B}_{\varepsilon_\nu}(\alpha+1,\beta)} \mathrm{B}^{\nu}(\alpha,\beta) \qquad (3)$$

где $\varepsilon_p = \dfrac{R_p}{R_{\max}} = \dfrac{\mathrm{B}(\alpha+1,\beta)}{\mathrm{B}(\alpha,\beta)}$.

3. Моделирование шероховатых поверхностей

Считаем, что исходными данными для модельного представления шероховатой поверхности являются параметры шероховатости по стандартам ISO 4287–1997, ISO 4287/1–1997: максимальная высота неровностей $R_{\max}$, среднее арифметическое отклонение профиля R_a, среднеквадратическое отклонение профиля R_q, глубина сглаживания R_p, шаг неровностей по вершинам S, шаг неровностей по средней линии S_m, относительная опорная длина профиля t_p, относительная опорная длина профиля на средней линии t_m, средний наклон профиля Δ_a, средний квадратический наклон профиля Δ_q. Таким образом, для разрабатываемой модели стандартные параметры шероховатости по главным корреляционным направлениям должны совпадать с соответствующими параметрами реальной поверхности.

Для описания всей шероховатой поверхности необходимо знать одну из двух функций:

$$\eta_u(\varepsilon) = \frac{A_u}{A_c} \quad \text{или} \quad \varphi_n(u) = \frac{n_u}{n_c},$$

где A_u – площадь сечения материала на относительном уровне $\varepsilon = h/R_{\max}$; A_c – контурная площадь; n_u – число неровностей, вершины которых расположены выше уровня u; n_c – общее число неровностей.

Так как согласно стандарту ISO 4287–1997 параметры шероховатости определяются из профилограмм, а функции, описывающие распределение для профиля t_p и поверхности $\eta_u(\varepsilon)$, совпадают, что не выполняется для функций распределения вершин и впадин неровности профиля $\varphi_{nl}(u_l)$ и поверхности $\varphi_n(u)$, то в основу модели положена опорная кривая профиля.

В своих работах Н. Б. Демкин и И. В. Крагельский, при описании начальной части опорной кривой профиля параболой, для нахождения функции φ_n задавали ее вид $\varphi_n = C_n u^{\chi}$. Такой подход, как показано в работе [12], не совсем корректен.

Если опорную кривую профиля описывают уравнением (1)

То функция и плотность распределения неровностей по высоте равны:

$$\varphi_n(u) = \left(\frac{u}{\varepsilon_s}\right)^{\nu-1}; \qquad \varphi'_n(u) = \frac{(\nu-1)\,u^{\nu-2}}{\varepsilon_s^{\nu-1}}. \qquad (4)$$

Таким образом, функция распределения неровностей является степенной только в том случае, если опорную кривую профиля описывают выражением (1). Для других случаев, как будет показано ниже, функция распределения неровностей принимает другой вид.

В работах [13, 14, 15] приведено описание усовершенствованных моделей шероховатых поверхностей. Шероховатая поверхность в них представлена как совокупность струк структурно неорганизованных поверхностей отдельных неровностей самоподобной формы и случайных размеров, распределение вершин и впадин которых описывают функцией $\varphi_n(u, v)$. Расположение отдельной неровности в шероховатом слое определяется относительными уровнями u и v (рис. 1), а распределение материала (индекс u) и свободного пространства (индекс v) описывают функциями: $\eta_{ui}(\varepsilon_i) = \dfrac{A_{ui}(h_{ui})}{A_i}$; $\eta_{vi}(\xi_i) = \dfrac{A_{vi}(h_{vi})}{A_i} = 1 - \eta_{ui}(1-\xi_i)$,

где $\varepsilon_i = \dfrac{h_{ui}}{H_i}$; $\xi_i = \dfrac{h_{vi}}{H_i}$; $A_i = A_{ci} = A_{ui} + A_{vi} = \psi_c(\omega) A_{c\max}$; $\psi_c(\omega) \in [0,1]$; $\omega = 1 - u - v$;

A_{ci} – площадь, приходящаяся на одну неровность; $A_{c\max}$ – максимальная площадь, приходящаяся на одну неровность; ω – относительная высота i-й неровности.

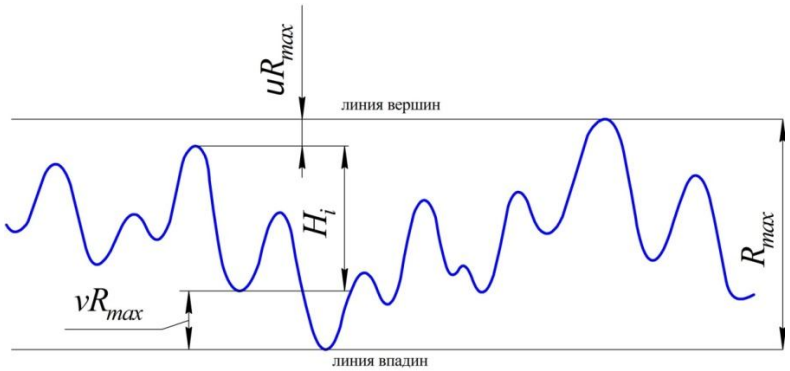


Рис. 1. Схема шероховатой поверхности

Для описания всей шероховатой поверхности при известных функциях необходимо знать одну из двух функций: $\eta_u(\varepsilon)=\dfrac{A_u}{A_c}=1-\eta_u(\xi)$ или $\varphi_n(u,v)=\dfrac{n(u,v)}{n_c}$,

где $n_v(\xi)=A_v/A_c$; $\xi+\varepsilon=1$; A_u, A_v – площадь сечения материала и свободного полупространства на относительных уровнях ε и ξ; $n(u,v)$ – число неровностей, вершины которых расположены выше уровня u, а впадины – ниже уровня v; n_c – общее число неровностей. Тогда задача сводится к определению $\varphi_n(u,v)$.

Допустим, что функция $\eta_u(\varepsilon)$ монотонная и дважды дифференцируемая для $\varepsilon\in[0,1]$ и описывается выражением (2): $\eta_u(\varepsilon)=I_\varepsilon(\alpha,\beta)=\dfrac{B_\varepsilon(\alpha,\beta)}{B(\alpha,\beta)}$, $\eta(\xi)=\dfrac{B_\xi(\alpha,\beta)}{B(\alpha,\beta)}$.

Считая, что функции $\eta_{ui}(\xi_i)$, $\psi_c(\omega)$, $\varphi_n(u,v)$ монотонны и непрерывны, получим следующие выражения:

$$\eta_u(\varepsilon)=\frac{1}{C_a}\int_0^{\min(\varepsilon,\varepsilon_s)}du\left[\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}\eta_{ui}\left(\frac{\varepsilon-u}{\omega}\right)\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv+\int_{\min(\xi,\xi_s)}^{\min(\xi_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv\right]; \tag{5}$$

$$\eta_v(\xi)=\frac{1}{C_a}\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}dv\left[\int_0^{\min(\xi,\xi_s)}\eta_{vi}\left(\frac{\varepsilon-v}{\omega}\right)\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du+\int_{\min(\xi,\xi_s)}^{\min(\xi_s,1-v)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du\right]; \tag{6}$$

где $C_a=\dfrac{A_{cm}}{A_{c\max}}=\int_0^{\varepsilon_s}du\int_0^{\min(\xi_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)dv=\int_0^{\xi_s}dv\int_0^{\min(\varepsilon_s,1-u)}\psi_c(\omega)\varphi_n''(u,v)du$; ε_s, ξ_s – уровни насыщения вершин и впадин.

Решение уравнений (5), (6) относительно $\varphi_n(u,v)$ без наличия каких-либо гипотез, касающихся вида функции $\varphi_n(u,v)$ и соотношения параметров ε_s и ξ_s, даже при известных функциях $\eta_{ui}(\xi_i)$ и $\eta_{vi}(\xi_i)$ представляет собой некорректную задачу. Поэтому сделаны следующие допущения:

1. Функцию $\varphi_n''(u,v)$ можно представить в виде: $\varphi_n''(u,v)=f_u(u)f_v(v)f_\omega(\omega)$, (7)

где функция $f_\omega(\omega)=\omega^{\alpha_i-1}(1-\omega)^{\beta_i-1}$ определяет спектр неровностей и служит мерой взаимозависимости функций распределения вершин и впадин.

2. $\varepsilon_s+\xi_s=1$.

3. Вершины и впадины имеют одинаковую форму и их описывают параболоидом второго порядка. Тогда: $\eta_{ui}(\varepsilon_i)=\varepsilon_i$; $\eta_{vi}(\xi_i)=\xi_i$.

4. $\psi_c(\omega)=\omega^\gamma$; $\gamma\in[0,1]$.

С учетом допущений из уравнений (5) и (6) получим систему парных уравнений Фрейгольма первого рода

$$\eta_u''(\varepsilon)=\frac{d^2\eta_u(\varepsilon)}{d\varepsilon^2}=\frac{1}{C_a}f_u(\varepsilon)\int_0^{\xi_s}(1-\varepsilon-v)^{\alpha_i+\gamma-1}(\varepsilon+v)^{\beta_i-1}f_v(v)dv; \tag{8}$$

$$\eta_u''(\xi)=\frac{d^2\eta_u(\xi)}{d\xi^2}=\frac{1}{C_a}f_v(\xi)\int_0^{\varepsilon}(1-\xi-u)^{\alpha_1+\gamma-1}(\xi+v)^{\beta_1-1}f_u(u)du, \qquad (9)$$

которая, по крайней мере, при $\alpha_1+\gamma-1=n$, $\beta_1=m$, где n, m – целые числа, имеет аналитические решения.

Рассмотрим два случая.

Случай 1. Функции распределения вершин и впадин взаимонезависимы ($\alpha_1=1$, $\beta_1=1$); площадь, приходящаяся на отдельную неровность, пропорциональна ее высоте ($\gamma=1$), при этом радиус кривизны неровностей $r(\omega)$ = const. Тогда из выражения (7) с учетом решения системы уравнений (8) и (9) получим

$$\varphi_n''(u,v)=\frac{\eta_u''(u)}{\eta_u'(\varepsilon_s)}\frac{\eta_v''(v)}{\eta_v'(\xi_s)},\quad \varphi_n(u,v)=\frac{\eta_u'(u)}{\eta_u'(\varepsilon_s)}\frac{\eta_v'(v)}{\eta_v'(\xi_s)},\quad C_a=\frac{1}{\eta_u'(\varepsilon_s)}. \qquad (10)$$

Случай 2. Функции распределения вершин и впадин взаимозависисмы ($\alpha_1=2$, $\beta_1=1$); площадь, приходящаяся на отдельную неровность, является постоянной ($\gamma=0$), при этом $r(\omega)\sim\omega^{-1}$. Тогда:

$$\varphi_n''(u,v)=\frac{\eta_u''(u)}{\eta_u'(\varepsilon_s)}\eta_v''(v)\cdot(1-u-v),$$

$$\varphi_n(u,v)=\frac{\eta_u'(u)}{\eta_u'(\varepsilon_s)}\eta_v'(v)\left[1-v-u+\frac{\eta_u(u)}{\eta_u'(u)}+\frac{\eta_v(v)}{\eta_v'(v)}\right],\quad C_a=1. \qquad (11)$$

С учетом (2) для $\varphi_n''(u,v)$ и C_a получим:

для случая 1: $\varphi_n''(u,v)=\dfrac{B_u''(\alpha,\beta)}{B_{\varepsilon_s}'(\alpha,\beta)}\cdot\dfrac{B_v''(\beta,\alpha)}{B_{\xi_s}'(\beta,\alpha)}$, $\qquad C_a=\dfrac{B(\alpha,\beta)}{B_{\varepsilon_s}'(\alpha,\beta)}$;

для случая 2: $\varphi_n''(u,v)=\dfrac{B_u''(\alpha,\beta)}{B_{\varepsilon_s}'(\alpha,\beta)}\cdot\dfrac{B_v''(\beta,\alpha)}{B(\beta,\alpha)}\cdot(1-u-v)$,

где $\varepsilon_s=\dfrac{\alpha-1}{\alpha+\beta-2}$, $\xi_s=\dfrac{\beta-1}{\alpha+\beta-2}$.

Для случая 1 из выражения (10) с учетом (2) получим:

$$\varphi_{n1}(u)=\varphi_n(u,\xi_s)=\frac{\eta_u'(u)}{\eta_u'(\varepsilon_s)}=\frac{u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}};$$
$$\varphi_{n1}'(u)=\frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\alpha-2}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}. \qquad (12)$$

Аналогично для случая 2 из выражения (3.10) имеем:

$$\varphi_{n2}(u)=\varphi_n(u,\xi_s)=\frac{1}{B(\alpha,\beta)}\left[(\varepsilon_s-u)B_u'(\alpha,\beta)+B_u(\alpha,\beta)+\frac{B_u'(\alpha,\beta)B_{\xi s}(\beta,\alpha)}{B_{\varepsilon s}'(\alpha,\beta)}\right],$$
$$\varphi_{n2}'(u)=\frac{1}{B(\alpha,\beta)}\cdot\left\{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]\right\}\left(\varepsilon_S-u+\frac{B_{\xi s}(\beta,\alpha)}{\varepsilon_S^{\alpha-1}(1-\varepsilon_S)}\right). \qquad (13)$$

Полученные модели можно упростить, если предположить, что высота отдельной неровности (ω = const), площадь, приходящаяся на отдельную неровность и радиус кривизны неровности, являются постоянными величинами.

Допустим, что опорную кривую профиля можно описать выражением (2). Тогда аналогично методике работы [5] при использовании выражения (1) и получим:

$$\varphi_n(u)=\frac{\eta_u'(u)}{C}=\frac{u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1}}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}};$$
$$\varphi_n'(u)=\frac{\eta_u''(u)}{C}=\frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}\left[(\alpha-1)(1-u)-(\beta-1)u\right]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}, \qquad (14)$$

при этом $\omega = 1 - \varepsilon_s$.

Таким образом, в данном случае получены выражения, тождественные выражениям (12).

Для фрактальной модели шероховатости относительная высота отдельной неровности ω находися в пределах 0,15…0,25. Если принять, что высота отдельной неровности ω является постоянной величиной, то распределение выступов неровностей для такой фрактально-дискретной модели шероховатости определяется выражениями [16, 17]:

$$\varphi_{n3}(u) = \omega \sum_{k=0}^{n} \eta'(u - k\omega), \tag{15}$$

$$\varphi'_{n3}(u) = \frac{\omega}{\mathrm{B}(\alpha,\beta)} \sum_{k=0}^{n} (\alpha-1)(u-k\omega)^{\alpha-2}(\beta-1)(1-u+k\omega)^{\beta-1} - (\beta-1)(u-k\omega)^{\alpha-1}(\alpha-1)(1-u+k\omega)^{\beta-2}, \tag{16}$$

где $n = \mathrm{int}\left(\frac{u}{\omega}\right)$, $\omega = \left[\frac{\mathrm{B}(\alpha,\beta)}{\sum_{k=1}^{m}(1-k\omega)^{\alpha-1}k^{\beta-1}}\right]^{\frac{1}{\beta}}$. (17)

Решение уравнения (17) дает несколько значений ω, из них выбирают то, при котором распределение вершин неровностей максимально соответствует реальной поверхности.

Вид функций плотности распределения высот неровностей, описываемых выражениями (4), (12), (13) и (16) для разных значений параметров α и β, показан на рис. 2 *а* – 2 *г* соответственно.

Как следует из рисунка 2, число неровностей, находящихся выше уровня u = 0,25…0,30, для кривых на рис.2 *б, в, г* примерно в 1,5 раза больше, чем для кривой на рис. 2 *а*, что значительно сказывается при определении характеристик контакта шероховатых поверхностей. Модель шероховатой поверхности, соответствующая рис. 2 *а*, следует использовать для u<(0,1…0,15), т.е. при контактировании неровностей соответствующих верхней части опорной кривой.

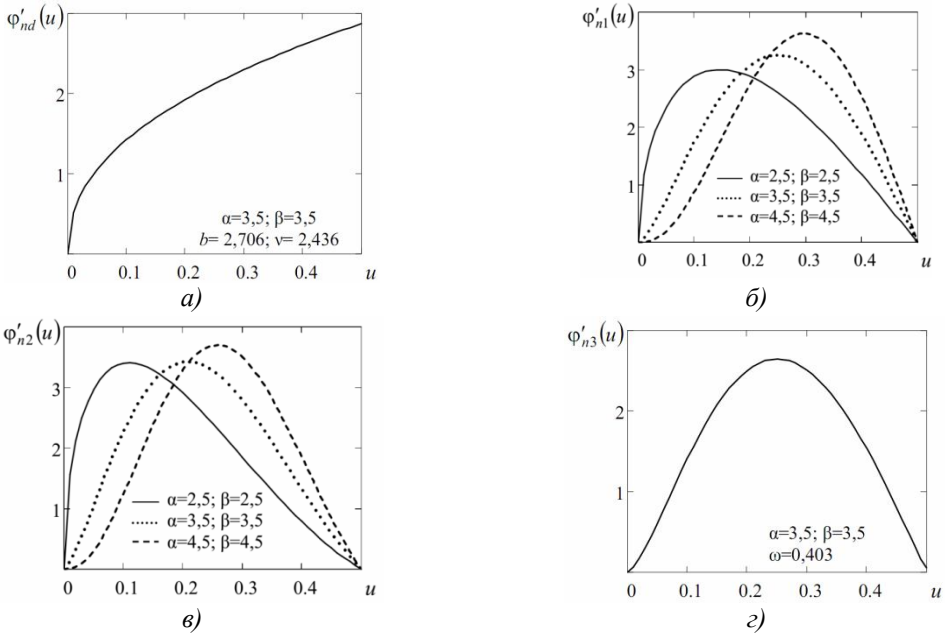


Рис. 2. Функции плотности распределения выступов неровностей $\varphi'_{ni}(u)$

Совпадение значений, определенных с помощью выражений (12) и (14), для функций φ_n и φ_n' свидетельствует о качественном описании шероховатости с помощью упрощенной модели. Причем при определении контактных характеристик будет использоваться одномерная функция распределения неровностей, что значительно упростит расчеты.

4. Параметры эквивалентной шероховатой поверхности

Контакт двух шероховатых поверхностей $z_i(x,y), i=1;2,$ можно представить как контакт эквивалентной шероховатой поверхности $z(x,y)=\sum_{i=1}^{2} z_i(x,y)$ и гладкой поверхности.

Исходными данными для определения параметров микрогеометрии эквивалентной поверхности являются следующие параметры микрогеометрии каждой из контактирующих поверхностей: $R_{\max}, R_{qi}, R_{pi}, S_i, S_{mi}, t_{pi}$.

Рассматривая шероховатые поверхности как случайные стационарные поля, из теоремы о сумме средних значений и дисперсий независимых случайных процессов имеем:

$$R_{\max}=\sum_{i=1}^{2} R_{\max i}; \quad R_p=\sum_{i=1}^{2} R_{pi}; \quad R_q^2=\sum_{i=1}^{2} R_{qi}^2. \tag{20}$$

Для определения эквивалентных значений S и S_m используем выражение эквивалентного числа нулей и максимумов [5]

$$\frac{1}{S}=\left[\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{R_{qi}}{R_q S_i}\right)^2\right]^{0,5}; \quad \frac{1}{S_m}=\left[\sum_{i=1}^{2}\left(\frac{R_{qi}}{R_q S_{mi}}\right)^2\right]^{0,5}. \tag{21}$$

Параметры эквивалентной опорной кривой при ее аппроксимации отношением неполной бета-функции определяются выражением (2а) через параметры $R_p, R_q, R_{\max}$ эквивалентной поверхности.

Использование выражений (20) и (21) позволяет определить параметры модели эквивалентной поверхности $\alpha_1, \beta_1, \gamma, A_{c\max}$ для обеспечения равенства соответствующих параметров шероховатости модели и эквивалентной поверхности.

В общем случае при расчете параметров эквивалентной поверхности S_x, S_y, S_{mx}, S_{my} необходимо учесть главные корреляционные направления каждой из контактирующих поверхностей и определить главные корреляционные направления эквивалентной поверхности. Поэтому при определении S_x, S_y, S_{mx}, S_{my} выражениями (20) и (21) можно пользоваться только в случае, если главные корреляционные направления контактирующих поверхностей совпадают.

5. Примеры применения для решения задач герметологии

Научно-обоснованная методика определения величины утечки (герметичности) разработана учеными-герметологами Братского государственного университета [18] и получила дальнейшее развитие в монографиях[15, 19 - 22]. Блок-схема определения герметичности приведена на рис. 3.

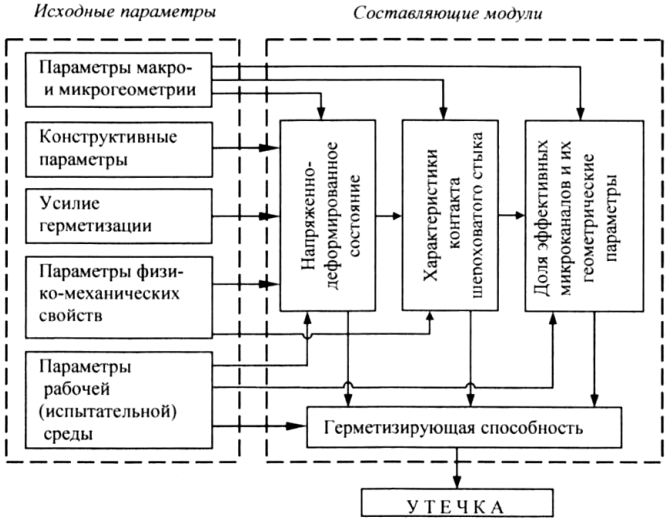


Рис. 3. Блок-схема определения герметичности УС

Герметичность уплотнительных соединений обеспечивается нагружением их усилием (контактными давлениями герметизации) и в значительной мере определяется напряженно-деформированным состоянием в зоне контакта и зависит от контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, которое характеризуется видом контакта, сближением поверхностей, относительной площадью контакта, плотностью зазоров в стыке и слиянием пятен контакта отдельных неровностей.

При определении напряженно-деформированного состояния (НДС) в зоне контакта вначале определяется ширина зоны контакта и распределение контактного давления. Общие вопросы определения НДС рассмотрены в работах [15, 20, 21], при начальном контакте золотника и седла вдоль полосы – в работах [23, 24], при начальном контакте вдоль линии – в работе [25]. Важное влияние на напряженно-деформированное состояние контактирующих тел оказывает коэффициент трения [26].

Для оценки герметизирующей способности уплотнительного стыка в работах используется безразмерный функционал проницаемости [27 - 29]:

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K_f \upsilon_i}{4(1-\eta)^2 K_l}, \tag{22}$$

где Λ – плотность зазоров в стыке; η – относительная площадь контакта; υ_i – доля эффективных микроканалов; K_f – коэффициент, учитывающий местные потери (из-за сужения и расширения микроканалов), K_l – коэффициент извилистости.

Параметр C_u зависит от параметров микрогеометрии и контактных давлений герметизации. Интенсивность утечки (массовый или объемный расход на единицу длины по периметру) определяется выражениями: $G_l = C_f \cdot C_u$, $Q_l = C_g \cdot C_u$; (23)

где $C_f = \frac{R_{\max}^3 \rho \Delta p}{2l\mu}$, $C_g = \frac{R_{\max}^3 \left(p_1^2 - p_2^2\right)}{4l\mu}$. (24)

Для определения характеристик контакта в шероховатом стыке широко используется хорошо зарекомендовавшую себя в герметологии дискретную модель шероховатости [5, 15, 20–22], или ее разновидность – фрактально-дискретную [16, 17, 19]. При этом для определения функции распределения неровностей по высоте следует использовать уравнение всей опорной кривой профиля, а не только ее начальной части.

В зависимости от свойств материалов и параметров микрогеометрии различают упругий, вязкоупругий, упругопластический и жесткопластический контакты. Вид контакта шероховатых поверхностей определяется критерием пластичности для отдельной контактирующей неровности [30, 31].

Важной характеристикой при определении герметизирующей способности уплотнительного стыка, как следует из выражения (22), является плотность зазоров. При контакте жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством плотность зазоров определяется с учетом деформации полупространства в окрестности каждой контактирующей неровности согласно данным работ: для однородного полупространства с учетом взаимного влияния неровностей – [32], без учета взаимного влияния – [33]; для упругого слоистого полупространства – [34].

Для герметизации среды с высокими энергетическими параметрами (давлением свыше 40 МПа и температурой свыше 300^{o}C) в основном используют металлические материалы [15]. В большинстве случаев при контактировании металлических шероховатых поверхностей контакт является упругопластическим. В этой связи в последние годы учеными Братской школы герметологов были рассмотрены вопросы, связанные с внедрением жесткой сферы в упругопластическое упрочняемое полупространство [35 - 42]. Это составило теоретическую основу для определения контактных характеристик – относительной площади контакта и плотности зазоров в стыке при внедрении жесткой шероховатой поверхности в упругопластическое полупространство [43, 44], что в конечном итоге позволило определить

влияние характеристик упрочняемого материала на герметизирующую способность уплотнительных соединений [45]. Для учета характеристик упрочняемости материала возможно использование эмпирического закона Майера [46].

Дискретная модель шероховатости, находит также широкое применение при расчетах герметичности уплотнительных соединений с тонкослойными покрытиями. Например, при упругом [47-49], вязкоупругом [50] и упругопластическом [51, 52] контактах шероховатой поверхности через слой покрытия, при управлении контактной жесткостью и износостойкостью многослойных покрытий [53 - 55], при управлении плотностью зазоров в уплотнительном стыке [56].

Особенностью расчетов контактных давлений герметизации для затворов ТА и сосудов высокого давления является использование при расчетах герметичности модели реального газа в вириальной форме [57, 58].

Практический интерес вызывает прогнозирование герметичности при различных условиях эксплуатации, приводящих к разгрузке предварительно нагруженного уплотнительного соединения. Особенно это актуально при проектировании фланцевых соединений и затворов сосудов высокого давления. Для решения этой задачи необходимо использовать результаты по изменению контактных характеристик – относительной площади контакта и плотности зазоров при разгрузке предварительно нагруженного неподвижного стыка шероховатых поверхностей [59, 60].

Заключение.

1. Отличительной характеристикой уплотнительного стыка неподвижных соединений является величина контактного давления, превышающая аналогичное в узлах трения на 1…2 порядка.

2. Для определения функции распределения неровностей по высоте следует использовать уравнение всей опорной кривой профиля, а не только ее начальной части.

3. Приведены многочисленные примеры использования усовершенствованных дискретных моделей шероховатости для определения относительной площади контакта, плотности зазоров и функционала проницаемости при различных условиях контактного взаимодействия.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания на выполнение НИР № 2014/10 на 2016 г. (проект № 1754).

Литература:

1. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 226 с.
2. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Опыт решения контактных задач в герметологии неподвижных соединений // Труды братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки . 2016. Т. 1. С. 163-169.
3. Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Холодилов О.В. Методы анализа микрогеометрии поверхностей // Трение и износ. 1989. Т. 10. № 1. С. 138-155.
4. Свиреденок А.И., Чижик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Наука і тэхніка, 1990. 272 с.
5. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2006. 159 с.
6. Демкин И.Б., Коротков М.А., Алексеев В.М. Методика расчета характеристик фрикционного контакта / Расчет и моделирование режима работы тормозных и фрикционных устройств. М.: Наука, 1974. С. 5-15.
7. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1974. 526 с.
8. Кузнецов Е.А., Гороховский Г.А. Фрикционное взаимодействие шероховатых тел с позиций механики твердого тела// Трение и износ. 1980. Т. 1. № 4. С. 638-648.
9. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. М.-Л.: Гостехиздат, 1949. 270 с.
10. Огар П.М., Горохов Д.Б., Кожевников А.С., Угрюмова Е.В. Основы моделирования шероховатых поверхностей уплотнительных стыков // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 2. С. 55-70.
11. Демкин Н.Б. Выражение опорной кривой с помощью бета функции / Контактное взаимодействие твердых тел. Калинин: КГУ, 1982. С. 3-9.

12. Огар П.М., Горохов Д.Б. Соотношение между параметрами опорных кривых профиля при описании их параболой и отношением бета-функции // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 161-164.

13. Долотов А.М., Огар П.М, Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирование уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с.

14. Огар П.М., Корсак И.И., Сухов О.Ю. Математическая модель шероховатой поверхности / Математическое моделирование: численные методы и комплексы программ: межвуз. тем. сб. тр. СПб.: СПГАСУ, 2000. Вып. 6. С. 49–55.

15. Огар П.М., Корсак И.И., Сухов О.Ю. Связь параметров модели шероховатой поверхности со стандартными параметрами шероховатости / Математическое моделирование: численные методы и комплексы программ: межвуз. тем. сб. тр. СПб.: СПГАСУ, 2001. Вып. 7. С. 183–192.

16. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие фрактальных шероховатых поверхностей деталей машин // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 309-313.

17. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 6. С. 30-38.

18. Огар П.М. Контактные характеристики и герметичность неподвижных стыков пневмогидротопливных систем двигателей летательных аппаратов: дис…докт. техн. наук. Самара: СГАУ, 1997. 345 с.

19. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактирование шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск: Изд-во БрГУ. 2007. 171 с

20. Огар П.М., Тарасов В.А., Корсак И.И. Оптимальное проектирование затворов трубопроводной арматуры. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. 145 с.

21. Огар П.М, Тарасов В.А. Проектирование затворов специальной трубопроводной арматуры: монография. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. 191 с.

22. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 282 с.

23. Огар П.М., Тарасов В.А., Амиров В.В. Контакт деталей машин с начальным касанием вдоль полосы // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2004. Т. 2. С. 164-170.

24. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Особенности контакта конусных затворов с начальным касанием вдоль полосы // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2007. № 2. С. 121-125.

25. Белокобыльский С.В., Огар П.М., Тарасов В.А. Контакт конусных затворов с начальным касанием по линии // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2007. № 2. С. 125-129.

26. Огар П.М., Тарасов В.А., Семенов С.А. Особенности учета трения при проектировании затворов трубопроводной арматуры // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 113-118.

27. Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А. Герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 2 (14). С. 63-65.

28. Огар П.М., Тарасов В.А, Турченко А.В. Герметизирующая способность тяжелонагруженных уплотнительных стыков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3 (23). С. 136-142.

29. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Герметичность уплотнительных соединений с тонкослойными упругими покрытиями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 34-40.

30. Огар П.М., Дайнеко А.А., Клюс С.С. Критерий пластичности при моделировании контакта тяжелонагруженных шероховатых поверхностей // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 14-18.

31. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Критерий пластичности для единичной неровности при контактировании жесткой шероховатой поверхности с полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2. С. 29-34.

32. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Плотность стыка при упругом контакте шероховатых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 12. С. 35-40.

33. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Плотность зазоров в стыке при упругом контакте шероховатых поверхностей // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 2. С. 13-18.

34. Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Плотность зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2015. (25). С. 60-65.

35. Огар П.М., Дайнеко А.А., Щур Д.Д. Контакт жесткой сферической неровности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 17-19.

36. Огар П.М., Тарасов В.А, Дайнеко А.А. О некоторых общих закономерностях упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 8. С. 38-43.

37. Огар П.М., Тарасов В.А, Дайнеко А.А. К вопросу упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С.14-16.

38. Огар П.М., Тарасов В.А, Турченко А.В. Влияние характеристик упрочняемого материала на упругопластическое внедрение сферической неровности // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 12. С. 29-34.

39. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Геометрия контакта при упругопластическом внедрении сферической неровности // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1(13). С. 9-16.

40. Огар П.М., Тарасов В.А, Турченко А.В. Описание взаимодействия жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 163-169.

41. Огар П.М., Тарасов В.А, Турченко А.В. Изменение экспоненты кривой разгрузки при сферическом индентировании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 2. С. 39-42.

42. Ogar P.M. Tarasov V.A. Kinetic indentation application to determine contact characteristics of sphere and elastoplastic half-space // Advanced Materials Research. Vol.664 (2013). pp. 625-631.

43. Огар П.М., Тарасов В.А, Турченко А.В. Контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1(13). С. 17-22.

44. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Трибомеханика упругопластического контакта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2. С. 116-122.

45. Алпатов Ю.Н., Тарасов В.А. Турченко А.В. Влияние характеристик упрочняемого материала на герметизирующую способность соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 83-88.

46. Огар П.М., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Учет характеристик упрочняемого материала при применении эмпирического закона Майера // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4. С. 50-54.

47. Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Относительная площадь контакта при взаимодействии шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3. С. 49-51.

48. Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Влияние толщины покрытия на относительную площадь контакта сопряжений деталей машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. №2. С. 13-15.

49. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. The influence of coating thickness on the relative area of triounits contact // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1061-1062. С. 614-618.

50. Огар П.М., Беляева О.В., Алпатов Ю.Н. Контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством через слой вязкоупругого покрытия // Системы. Методы. Технологии. 2011. №2(10). С. 10-14.

51. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контактирование жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.

52. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние толщины упругопластического покрытия на относительную площадь контакта // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4. С. 14-17.

53. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2006. № 2. С. 297-302.

54. Огар П.М, Ключев Е.А., Максимова О.В. Инженерная методика определения упругих характеристик топокомпозитов // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 19-22.

55. Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Управление жесткостью контактных систем уплотнительных соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 22-27.

56. Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Моделирование контакта жесткой шероховатой поверхности через слой покрытия // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. № 2. С. 47-55.

57. Огар П.М., Тарасов В.А., Межецкий В.И. Расчет герметичности затворов трубопроводной арматуры и сосудов высокого давления // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 9. С. 45-50.

58. Огар П.М., Соболевский А.А. Расчет утечки газовой среды через стык разъемных соединений при высоких энергетических параметрах // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3 (31). С. 28-32.

59. Огар П.М., Тарасов В.А., Горохов Д.Б. Особенности контакта жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством при разгрузке // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 41-46.

60. Огар П.М., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Ступин А.С. Герметизирующая способность при разгрузке предварительно нагруженного неподвижного уплотнительного соединения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 3 (43). С. 140-148.

Mathematical model of a rough surface for solving the problems of hermetology

Gorokhov D.B.[a], Kozhevnikov A.S.[b], Ugrumova E.V.[c]

Bratsk State University, Makarenko st. 40, Bratsk, Russia
[a]denis_gorohov@mail.ru, [b]kozhevnikovart@inbox.ru, [c]weblab@brstu.ru

Key words: rough surface, roughness parameters, bearing profile curve, bearing profile curve parameters, beta-function, asperity peaks distribution, height peaks distribution, relative contact area, density of gaps in the joint

The fundamentals of modeling rough surfaces of sealing joints are shown. Their characteristic are the excess of the applied contact pressure in comparison with the friction nodes by 1 ... 2 orders. A rough surface is represented by a set of separate asperities of a self-similar shape and random dimensions, which peaks and valleys distribution are described by a two-dimensional function. The ratio of the beta-function is used to describe the bearing profile curve. Relationships between the parameters α and β when the bearing profile curve is described by the ratio of the beta function and the parameters ν and b when the bearing profile curve is described by the parabola are determined. The problem of modeling a rough surface is presented as a definition of the distribution function of the asperities on height, depending on the parameters of the bearing profile curve. Examples of the use of the proposed models for solving the problems of hermetology during different types of contact of rough surfaces are given.

УДК 629.4.015

Исследование вида напряженно-деформированного состояния экспериментальной модели штуцерного узла сосуда давления методом конечных элементов

Зеньков Е.В.

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия
jovanny1@yandex.ru

Ключевые слова: штуцерный узел, вид напряженного состояния, моделирование, метод конечных элементов

В статье рассматривается моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) экспериментальной модели штуцерного узла со сферическим корпусом при его квазистатическом нагружении внутренним давлением. Расчетная оценка НДС экспериментальной модели осуществляется с применением экспериментальных результатов, полученных при испытании до разрушения этой модели, и с учетом упругопластического характера деформирования материала штуцерного узла. Использованы уравнения пластического течения с изотропным упрочнением – уравнения Прандтля-Рейсса, реализованные в программе Femap (with NX Nastran). Полученные расчетные данные позволили установить, что вид НДС в зоне разрушения штуцерного узла на его наружной поверхности в зоне стыка существенно выше, чем на кромке отверстия внутри сосуда, где величина интенсивности деформации максимальна.

Конструкционная прочность элементов машиностроения должна в ряде случаев осуществляться с учётом вида их напряжённо-деформированного состояния (НДС). Ряд соответствующих уточненных методик расчёта на прочность [1,2] опирается при этом на результаты лабораторных испытаний образцов, имеющих в очаге их разрушения тот же вид НДС, что и в рассматриваемом элементе. Применение методики расчёта на статическую прочность, изложенной например в [2], предусматривает выполнения этапа, заключающегося в

предварительном вычислении характеристик НДС рассматриваемого элемента конструкции с помощью численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ). В данной работе рассматривается реализация указанного этапа путем определения характеристик НДС штуцерного узла сосуда давления, работающего в условиях сложного напряженного состояния.

В качестве критерия подобия НДС деформируемого элемента, прочность которого оценивается, и НДС рабочей зоны образца, используемого для механических испытаний, вычисляется характеристика вида НДС – *П*, определяемая соотношением

$$П = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \qquad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, определяемая формулой:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}\,. \qquad (2)$$

σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения – характеристики НДС деформируемого элемента в очаге его возможного разрушения.

Выбор в качестве характеристики вида НДС величины *П*, характеризуемой соотношением (1), служит то обстоятельство, что коэффициент *П* является инвариантной характеристикой вида НДС – её большим значениям соответствует (по терминологии Г.А. Смирнова-Аляева) более жёсткий вид НДС, а её меньшим значениям – более мягкий вид НДС. Помимо физической инвариантности, особенностью и, одновременно, преимуществом критерия *П*, является его зависимость от всех трех главных напряжений в очаге разрушения. Например, одноосное растяжение стандартного цилиндрического образца соответствует значению *П* = 1, кручение – *П* = 0, сжатие – *П* = –1, двухосное растяжение соответствует $1 < П < 2$.

Известно, что увеличение коэффициента *П* в некоторой зоне конструкции может привести к тому, что очаг разрушения перемещается в эту зону, несмотря на то, что уровень напряжений в ней не является максимальным для конструкции в целом [1, 3]. Существенно, что такое перемещение может происходить как в случае циклического характера нагружения конструкции [1], так и в случае её квазистатического разрушения [3].

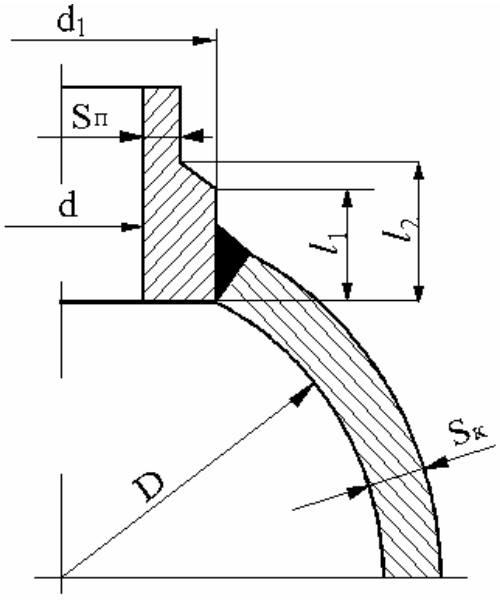


Рис. 1. Конструктивная схема сферического днища сосуда со штуцером

Рассмотрим НДС экспериментальной модели штуцерного узла со сферическим корпусом при его квазистатическом нагружении внутренним давлением. Необходимые экспериментальные данные – схема модели, значения геометрических параметров, условия нагружения заимствованы из работы [3]. Конструктивная схема модели представлена на рис. 1, значения её геометрических параметров в таблице 1.

Таблица 1

Геометрические размеры экспериментальной модели

Рис. 1	D, мм	d, мм	d_1, мм	$S_п$, мм	$S_к$, мм	l_1, мм	L_2, мм
	500	148	216	14,7	24,6	28	59

Сферический корпус модели изготовлялся из стали 09Г2С с пределами текучести $\sigma_т$ = 331 МПа и прочности $\sigma_в$ = 487 МПа, приварной штуцер был из стали этой же марки, характеризуемой равенствами $\sigma_т$ = 310 МПа, $\sigma_в$ = 484 МПа. Фактическое значение давления разрушения модели 77,7 МПа [3].

Расчетная оценка НДС в зоне разрушения экспериментальной модели осуществлялась с применением экспериментальных результатов, полученных при испытании до разрушения этой модели, и с учетом упругопластического характера деформирования материала штуцерного узла.

В качестве математической модели процесса развития упругопластических деформаций, возникающих в процессе деформирования материала штуцерного узла, использованы уравнения пластического течения с изотропным упрочнением (уравнения Прандтля-Рейсса [5]). Выбор этой теории связан с тем, что применение уравнений пластического течения позволяет физически и геометрически корректно учесть историю нагружения испытываемых моделей деталей. Численная интерпретация уравнений этой теории реализована в программе Femap (with NX Nastran). Уравнения этой теории изложены в [5].

Решение соответствующей задачи теории течения для рассматриваемой детали строится с помощью метода пошагового нагружения [5, 6]. Нагружение модели узла осуществляется в этом случае за несколько шагов, величина которых определяется необходимой точностью аппроксимации рассматриваемого процесса. На каждом шаге краевые условия в своей совокупности образуют нелинейную краевую задачу. Указанная задача формулируется в приращениях перемещений, её решение существует и может быть определено известными способами нагружения [7]. В процессе решения на отдельном шаге используется представление

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}^p, \tag{3}$$

где $d\boldsymbol{\varepsilon}^e$ – приращение вектора упругих деформаций, $d\boldsymbol{\varepsilon}^p$ – приращение вектора пластических деформаций.

При реализации метода последовательных приближений уравнение решения представляется в форме, предложенной Ямадо [6]

$$d\sigma = [D^P]\, d\boldsymbol{\varepsilon}. \tag{4}$$

Здесь матрица $[D^P]$ занимает место матрицы D в соотношении (3) в случае появления пластических деформаций

$$[D^p] = [D] - [D]\left\{\frac{dF}{d\{\sigma\}}\right\}\left\{\frac{dF}{d\{\sigma\}}\right\}^T [D]\left[A + \left\{\frac{dF}{d\{\sigma\}}\right\}^T [D]\left\{\frac{dF}{d\{\sigma\}}\right\}\right]^{-1}, \tag{5}$$

где F – пластический потенциал; A – тангенс угла наклона кривой $\sigma = \Phi(\varepsilon^p)$ в точке, соответствующей величине σ_i – интенсивности напряжений, действующих на рассматриваемом шаге. Матрица $[D^P]$ в (4) симметрична и имеет смысл и в случае идеально-пластического материала, когда $A = 0$ [5].

Для оценки погрешности численного расчета экспериментально были определены остаточные пластические деформации [3]. По результатам измерений значения этих деформаций определялись равенствами:

$$\varepsilon^0_\theta = 12\%,\ \varepsilon^0_m = -4{,}2\%. \tag{6}$$

Используя условия пластической несжимаемости, было вычислено экспериментальное значение максимальной интенсивности остаточных деформаций на внутренней поверхности модели:

$$\varepsilon^0_i = 11{,}7\%. \qquad (7)$$

Численное моделирование возникающих в процессе разрушения экспериментальной модели упругопластических деформаций проводилось с использованием фактических диаграмм деформирования материалов [3], использованных при изготовлении сосуда со штуцером (различие в свойствах материалов сварного шва и корпуса при этом не учитывалось). Решение упругопластической задачи проводилось с определенным шагом по нагрузке, во время изменения которого свойства материала модели изменялись в зависимости от достигнутого уровня напряжений.

Для вычисления расчетных остаточных деформаций модель штуцерного узла нагружается в два этапа. Первый этап включал приложение основной нагрузки на модель – избыточное внутреннее давление, второй этап предусматривал разгрузку модели, имитируя процесс её разгерметизации вследствие разрушения. При разгрузке в расчетной модели учитывалось внутреннее давление малой величины – 0,01 МПа. Дискретизация расчетной модели сосуда представлена на рис. 2.

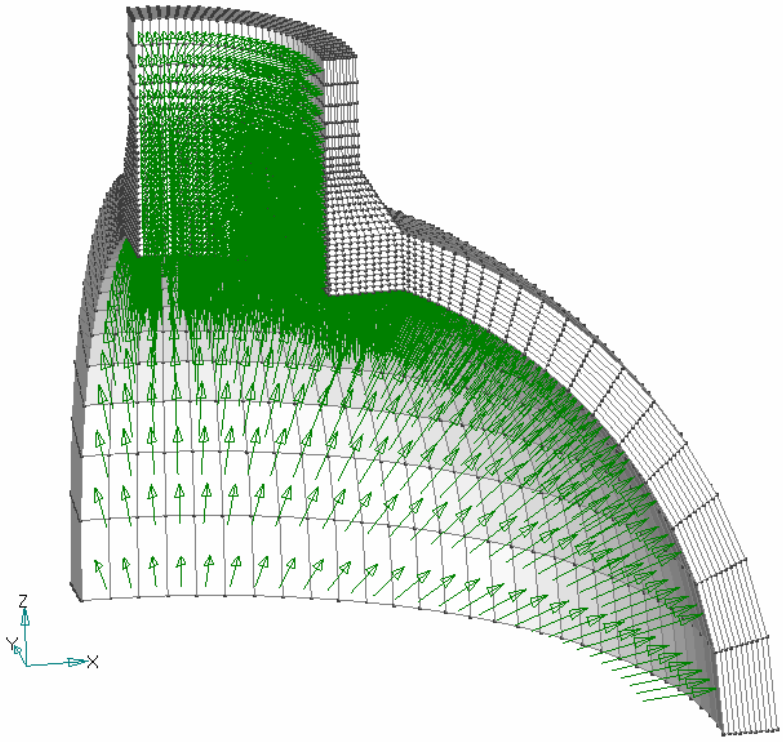


Рис. 2. Расчетная модель штуцерного узла сосуда давления

При численном пошаговом нагружении экспериментальной модели было определено расчётное значение давления разрушения $p_{вр}$, соответствующее экспериментально установленному значению остаточных деформаций на нижней поверхности штуцера $\varepsilon^0_i = 11{,}7\%$ (см. равенство (7)). При схематизации диаграмм деформирования с учетом площадки текучести (≈1,8%) и с учетом упрочения расчётное значение $p_{вр}$ составило 70 МПа. Результаты нелинейного анализа приведены на рис. 3.

Сопоставление расчётного значения $p_{вр}$ = 70 МПа и фактического давления разрушения $p_{вф}$ = 77,7 МПа показывает, что при учёте всех основных особенностей реальной кривой деформирования использованных материалов погрешность расчётного определении давления разрушения сосуда со штуцером в рассмотренном случае не превышает 10%.

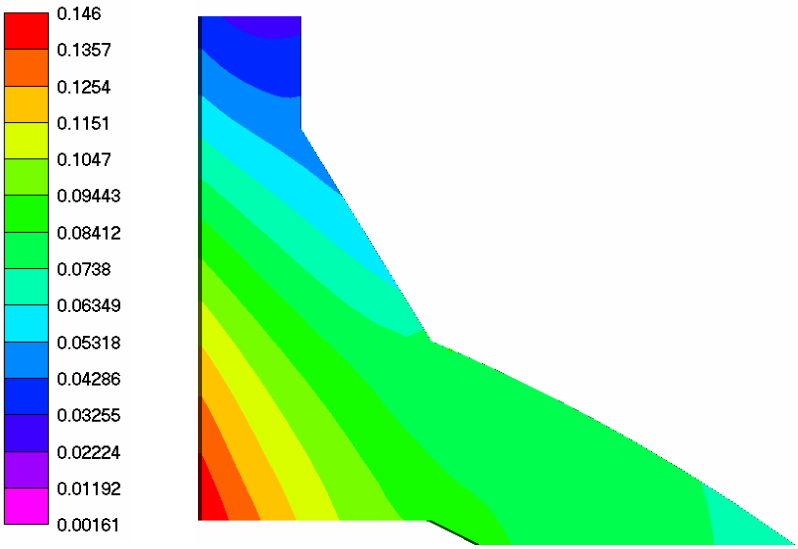
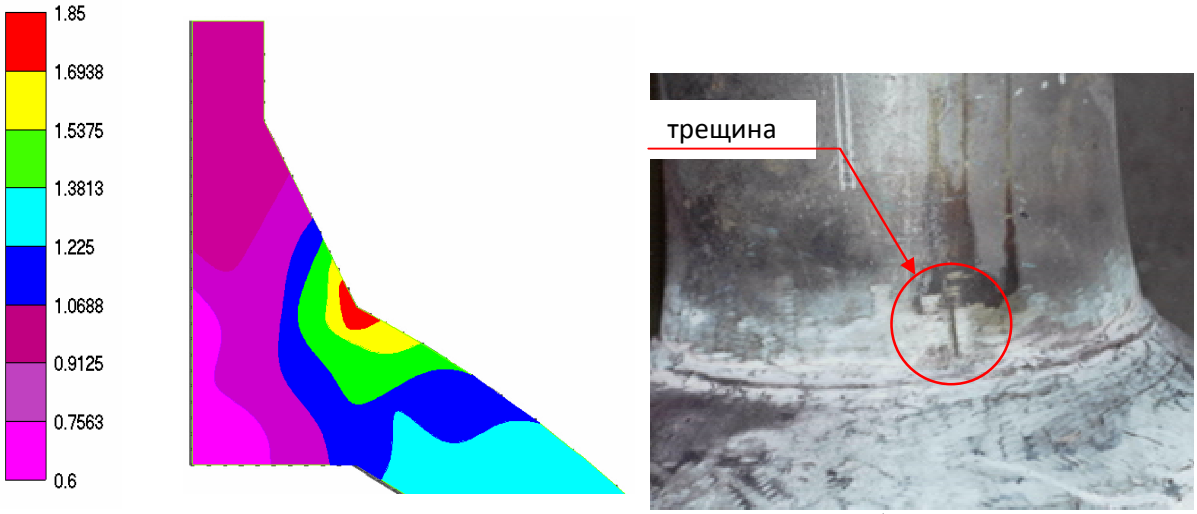


Рис. 3. Распределение по сечению штуцерного узла расчетной интенсивности остаточных пластических деформаций ε^0_i в момент его разрушения

Располагая расчетными характеристиками НДС в момент разрушения штуцерного узла был вычислен коэффициент жесткости вида НДС – *П* в узлах КЭ-сетки с помощью соотношения (1). На рис. 4*а* представлено распределение расчетных значений *П* по сечению штуцерного узла.



а *б*

Рис. 4. Распределение по сечению штуцерного узла расчетных значений коэффициента *П* (*а*) и образование трещины (*б*) в момент его разрушения

Расчетные данные позволили установить, что вид НДС в момент разрушения штуцерного узла на его наружной поверхности в зоне стыка существенно выше, чем на кромке отверстия внутри сосуда, где величина остаточных пластических деформации ε_i^p максимальна (рис. 3). При этом значение величины *П* в зоне разрушения (на наружной поверхности в зоне стыка штуцерного узла) определялось равенством *П* = 1,85, что соответствует двухосному растяжению (рис. 4*а*). В то время как на кромке отверстия внутри сосуда коэффициент вида НДС характеризуется объемным состоянием с сжимающими радиальными и меридиональными составляющими, т.е. *П* = 0,6.

Как показали экспериментальные исследования [3], испытанная модель штуцерного узла сосуда давления разрушилась с образованием сквозной трещины, рассекающей стенку узла штуцера по меридиану. Раскрытие трещины максимально в зоне стыка штуцера и корпуса ближе к наружной поверхности корпуса (рис. 4*б*).

Таким образом, влияние вида НДС на статическую прочность и на процессы разрушения требует более глубокого изучения. Это обстоятельство приводит к необходимости учета этого фактора при разработке и проектировании современных конструкций и сооружений, работающих в условиях двухосного напряженного состояния.

Литература:

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение., 1985. – 224 с.
2. Зеньков Е.В., Цвик Л.Б., Пыхалов А.А. Методика расчета на прочность деталей машин с учетом вида напряженного состояния / Механики XXI веку, 2015. – № 14. – С. 57-61.
3. Цвик Л.Б., Щеглов Б.А., Федотова С.И. и др. Укрепление отверстий и статическая прочность осесимметричных штуцерных узлов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1993. – № 1. – С 58-65.
4. Зеньков Е.В. Разработка и внедрение в практику метода испытания материалов при двухосном нагружении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. – № 10. – С. 50-57.
5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 398 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 572 с.
7. Лебедев А.А., Ламашевский В.П., Маковецкий И.В. Деформирование и прочность легированных сталей при низких температурах в условиях сложного состояния // Проблемы прочности. 2010. – № 4. – С. 28 – 37.
8. Еловенко Д.А. Анализ напряженного состояния многослойной несущей цилиндрической стенки сосуда давления, формообразованной на различных технологических параметрах / Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 2016. – С. 449-453.

Research the type of stress-strain state experimental model choke knot vessel pressure finite element method

Zenkov E.V.

Irkutsk State University of Railway Transport, 15 Chernishevskogo st., Irkutsk, 6664074, Russian Federation
jovanny1@yandex.ru

Keywords: choke assembly, view of the state of stress, simulation, finite element method

The article deals with modeling of stress-strain state (SSS) experimental model choke assembly with a spherical body with its quasi-static loading by internal pressure. The estimated experimental SSS term model is performed using the experimental results obtained when tested to failure of this model, and taking into account the nature of the elastic-plastic de formation choke assembly material. We use the equations of plastic flow with isotropic hardening - Prandtl-Reuss equations, implemented in the program Femap (with NX Nastran). The calculated data revealed that the form of SSS in the fracture zone choke assembly on its outer surface in the joint area is substantially higher than at the edge of the hole inside the vessel, where de formation intensity maximum value.

УДК 539.3

Определение скорости роста усталостных трещин в лопастях винта вертолета

Курохтин В.Ю.[1,a], Бохоева Л.А. [1,b], Кибирева Е.Е.[1,c]

[1]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40в стр. 1, Улан-Удэ, Россия
[a]kurokhtin91@gmail.com, [b]bohoeva@yandex.ru, [c]vip.kibireva@mail.ru

Ключевые слова: лопасть, усталостные испытания, трещина, ресурс, предел выносливости

В данной статье решается проблема, увеличения срока службы лопастей винта вертолета, путем включения в него времени докритического роста усталостной трещины. В ходе проведения усталостных испытаний лопастей с применением тензометрической аппаратуры и контрольно-измерительной системы в режиме реального времени снимаются показания напряжений и деформаций в лопасти и передаются на персональный компьютер, где сохраняются в архиве испытаний. Одновременно производится видеозапись процесса подрастания усталостной трещины в лопасти. Полученные данные проходят обработку, по итогам определяется скорость роста трещины в зависимости от времени ее роста. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что срок службы лопастей может быть увеличен как минимум на 5,1% от исходного, который составляет 2000 часов полета.

Введение

Ресурс лопастей винта вертолета, как и других деталей машин, зависит от следующих факторов: усталостного разрушения, износа, остаточных деформаций и других [1]. При этом процесс медленного подрастания трещин усталости ведет к необходимости оценки скорости их роста по причине того, что срок службы деталей машин может быть увеличен путем включения в него периода докритического роста трещины.

Выводы о ресурсе деталей машин делают по итогам ресурсных испытаний, когда в условиях лаборатории воспроизводят нагрузки, которые испытывает конструкция во время эксплуатации [2]. Одной из разновидностей ресурсных испытаний являются усталостные испытания, когда испытываемые изделия подвергают воздействию динамических нагрузок, определяемых программой испытаний. Основной критерий признания испытаний успешными – отсутствие усталостных трещин в любой степени развития после отработки определенного числа циклов нагружения [3]. При этом процесс докритического роста трещин не принимается во внимание, хотя практика испытаний показывает, что даже с имеющейся трещиной конструкция способна работать еще довольно продолжительное время. В связи с этим возникает вопрос: насколько может быть увеличен срок службы лопасти, если включить в него время медленного роста усталостной трещины? Данная задача решается путем проведения усталостных испытаний лопастей с одновременной видеосъемкой, позволяющей определить скорость докритического роста трещины, и последующей обработкой полученных данных.

Методика

Лаборатория «Надежность, прочность изделий и конструкций» при ООО «МИП «Байкальский научный центр прочности» проводит ресурсные испытания лопастей винта вертолета [4]. Лопасти изготавливаются из алюминиевого сплава АВТ-1. Испытания проводятся на специальных стендах по программе №Л-24-82 (Испытаний на выносливость образцов лопасти несущего винта) и ГОСТ РВ 15.307-2002. Схема испытательного стенда изображена на рис. 1.

Процесс испытаний начинается с входного контроля образцов. Далее производится подготовка образцов к испытаниям, которая включает в себя наклеивание на них тензодатчиков, настройку измерительных каналов и другие подобные операции [5]. Далее на образцы подается статическая растягивающая нагрузка. После достижения расчетного уровня напря-

жений добавляется динамическая нагрузка. Значения нагрузок для испытаний приведены в таблице 1.

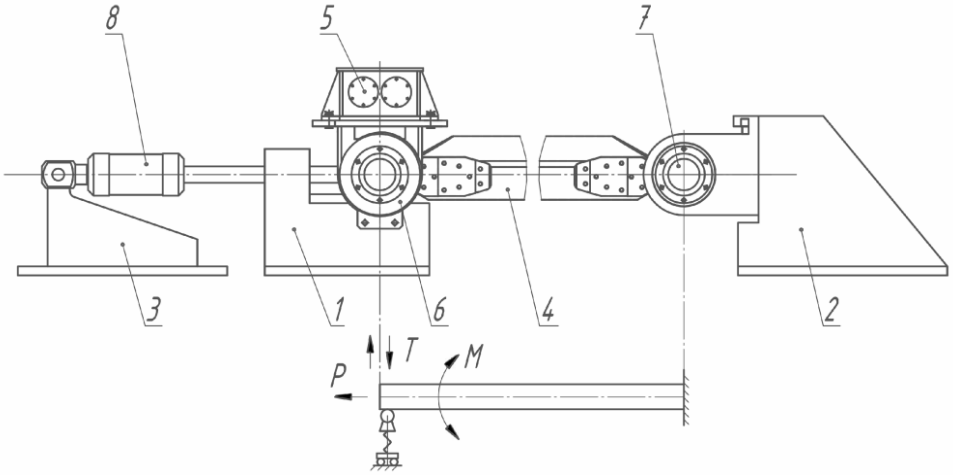


Рис. 1. Схема стенда и нагрузки, действующие на образец: 1,2,3 – опорные кронштейны, 4 – образец лопасти винта, 5 – вибратор, создающий толкающую вертикальную силу T, 6 – подвижная опора, 7 – неподвижная опора, 8 – гидроцилиндр, создающий статическое растягивающее усилие P, M – изгибающий момент, возникающий в образце под действием силы T

Таблица 1

Программа испытаний образцов

Режим	Постоянные нагрузки	Переменные нагрузки	Частота изменения знака изгибающего момента, Гц	Наработка, млн. цикл.
	Напряжение от осевой силы, МПа	Напряжение от изгибающего момента, МПа		
1	58,86	54	30	50
2		68,67		20
3		88,29		не более 20
Доламывания образца		34,34		до разрушения

Снятие показаний во время испытаний производится с помощью контрольно-измерительной системы, состоящей из двух уровней. Нижний уровень системы состоит из тензодатчиков, снимающих значения напряжений и деформаций и передающих их в режиме реального времени на верхний уровень с помощью сети Ethernet [6]. Верхний уровень состоит из персонального компьютера с установленным программным обеспечением, позволяющим строить графики изменения напряжений и деформаций в испытываемых образцах в режиме реального времени, а также сохранять их в архив испытаний.

Перед началом испытаний во внутреннюю полость лопасти нагнетается давление в 1 атмосферу [7]. При появлении трещины из-за выходящего воздуха происходит падение давления, и на экране компьютера появляется соответствующее сообщение. Местонахождение трещины определяется визуальным осмотром лопасти.

Процесс роста усталостной трещины записывается на видеокамеру. Для этого используется съемочная установка (рис. 2), состоящая из самой камеры, двух штативов и эластичных фиксаторов. Съемка продолжается вплоть до разрушения образца.

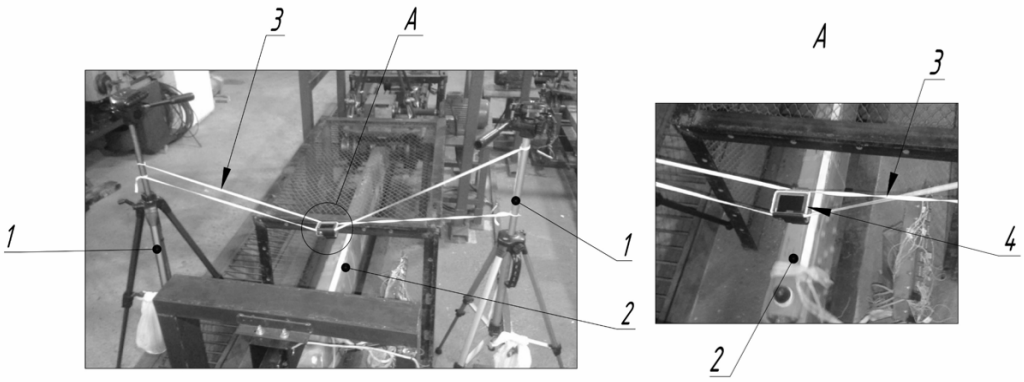


Рис. 2. Съемочная установка: 1 – штатив, 2 – лопасть, 3 – эластичные фиксаторы, 4 – камера

Результаты и обсуждение

В [8, 9] показано, что при базе испытаний $N = 1{,}6 \cdot 10^7$ циклов предел выносливости и его квадратическое отклонение соответственно равны

$$\overline{\sigma_{-1}} = \sum_{i=1}^{l} \Delta Q_i \cdot (\sigma_{-1})_i = 76{,}94 \text{ МПа};$$
$$S_{\sigma_{-1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{l} \Delta Q_i \cdot \left((\sigma_{-1})_i - \overline{\sigma_{-1}}\right)^2} = 2{,}32 \text{ МПа}. \quad (1)$$

При превышении напряжениями данного значения начинается процесс роста микроскопических усталостных трещин в лопасти.

Как было сказано выше, процесс роста усталостных трещин записывается на видеокамеру. После завершения испытаний, полученные записи проходят обработку в специальном программном обеспечении. Прежде всего, запись разделяется на отдельные кадры.

Каждый из кадров бинаризуется так, что на нем остаются только белый фон и черное изображение трещины. Каждому кадру ставится в соответствие прямоугольная матрица, состоящая из нулей и единиц, где нули соответствуют пикселям фона, а единицы – пикселям трещины [10]. В результате обработки данной матрицы методом построчной развертки определяются габариты трещины на каждом из кадров. Таким образом, может быть получена информация о росте трещины во время испытаний, которую можно представить в виде графиков (рис. 3) и таблицы 2.

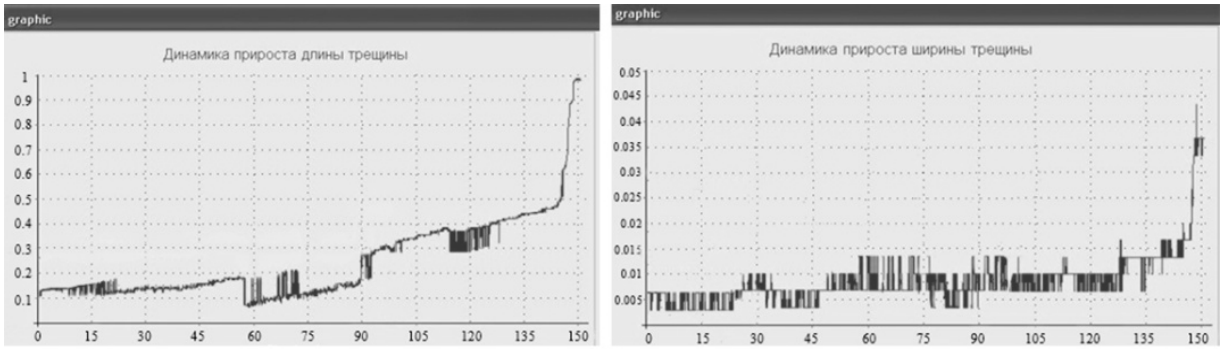


Рис. 3. Графики роста габаритов трещины (горизонтальная ось – время роста трещины, ч; вертикальная ось – скорость роста трещины, мм/ч)

Таблица 2

Зависимость скорости роста трещин от времени испытаний

t, ч	1	10	50	100	120	140	150	160	170	180	190	195	200
v, мм/ч	0,26	0,29	0,30	0,35	0,42	0,68	0,87	1,11	1,40	1,75	2,17	2,40	2,65

На основе обработки данных получены следующие функциональные зависимости скорости роста трещин (мм/ч) от времени их роста (ч):

$$v_{длина} = 8.386 \cdot 10^{-7} t^3 - 1.364 \cdot 10^{-4} t^2 + 5.722 \cdot 10^{-3} t + 0.255;$$
$$v_{ширина} = 8.184 \cdot 10^{-8} t^3 - 1.855 \cdot 10^{-5} t^2 + 1.066 \cdot 10^{-3} t + 9.811 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

В приведенной ниже таблице 3 представлены сведения о приросте ресурса лопастей с учетом времени докритического роста усталостной трещины на примере 10 образцов из числа прошедших испытания.

Таблица 3

№ образца	Исходный ресурс, ч	Время медленного роста трещины, ч	Максимальная скорость роста трещины, мм/ч	Прирост ресурса, %
1	2000	182	1,834	9,1
2		196	2,451	9,8
3		171	1,438	8,55
4		153	0,941	7,6
5		145	0,773	7,2
6		162	1,168	8,1
7		186	1,997	9,3
8		144	0,755	7,2
9		103	0,314	5,1
10		154	0,964	7,7

Выводы

При базе испытаний $N = 1{,}6 \cdot 10^7$ циклов нагружения максимальное значение напряжения, при котором в образцах лопастей не развиваются усталостные трещины, составляет $\sigma_{-1} = 76{,}94$ МПа . При превышении данного значения начинается медленный рост усталостной трещины, который продолжается в среднем 165 часов. Минимальное время роста составило 103 часа, это равняется 5,1% от исходного срока эксплуатации лопасти (2000 часов). В лопастях, в которых трещина развивалась более 200 часов, скорость ее роста превышала 2,6 мм/час, что создало бы опасность ее разрушения при эксплуатации.

Полученные данные могут быть использованы для увеличения срока службы лопастей, а также оптимизации технологии их производства на ЗАО «Улан-Удэнский лопастной завод».

Литература:

1. Бохоева Л. А., Курохтин В. Ю., Жерлова Е. А. Исследование роста трещин в изделиях авиационной техники на основе натурных испытаний // Сборник научных трудов. Серия: механика конструкций и материалов (композиционные материалы и наноматериалы). 2016. Вып. 1. С. 57-68.

2. Курохтин В. Ю. Определение усталостных характеристик лопасти винта вертолета на основе стендовых испытаний // Проблемы механики современных машин: материалы VI международной конференции. 2015. Т. 1. С. 173-177.

3. Хажинский Г. М. Основы расчетов на усталость и длительную прочность. М.: Ленанд, 2016. 168 с.

4. Бохоева Л. А., Рогов В. Е., Курохтин В. Ю., Перевалов А. В., Чермошенцева А. С. Определение ресурсных характеристик изделий авиационной техники на основе стендовых испытаний с использованием компьютерных технологий на примере лопасти винта вертолета // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4. С. 36-42.

5. Зуев Л. Б., Данилов В. И. Физические основы прочности материалов. Долгопрудный: Интеллект, 2013. 376 с.

6. Небелов Е. В., Потоцкий М. В., Родионов А. В., Горский А. Н. Механизм развития повреждений лопастей воздушного винта из композиционных материалов при воздействии поражающих элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 26-31.

7. Потапов С. Д., Перепелица Д. Д. Исследование влияния остаточных напряжений в зоне расположения трещины на скорость ее роста при циклическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 104-110.

8. Бохоева Л. А., Курохтин В. Ю., Перевалов А. В., Рогов В. Е., Покровский А. М., Чермошенцева А. С. Испытания элементов конструкций и узлов вертолета на усталостную прочность // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 1. С. 7-16.

9. Курохтин В. Ю. Определение усталостных прочностных характеристик авиационных изделий на основе ресурсных испытаний // Механики XXI веку. 2015. № 14. С. 22-28.

10. Пивоваров В. А., Семенихин Р. Л. Рекомендации по установлению ресурсов вертолету Ми-2 // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 5 (179). С. 107-113.

Determination of growth rate of fatigue cracks in helicopter propeller blades

Kurokhtin V. Yu.[1,a], Bokhoeva L. A. [1,b], Kibireva E. E.[1,c]

[1]East Siberia State University of Technology and Management, bldg. 1 40v Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation
[a]kurokhtin91@gmail.com, [b]bohoeva@yandex.ru, [c]vip.kibireva@mail.ru

Keywords: blade, fatigue tests, crack, useful life, endurance limit

In this article, the problem of extending the useful lifetime of helicopter propeller blades is solved by including the time of subcritical growth of the fatigue crack in it. In the course of blades' fatigue tests with the use of strain gauges and a control-measuring system, indications of stresses and deformations in the blade are taken in real time and transferred to a personal computer, where they are stored in the test archive. Simultaneously, a video recording of the process of growth of a fatigue crack in the blade is performed. The received data are processed the results determine the growth rate of the crack, depending on the time of its growth. The obtained results allow to conclude that the useful lifetime of the blades can be increased by at least 5.1% of the initial, which is 2000 flight hours.

УДК 539.3

Условия адгезии и антиадгезии

Шоркин В.С.[1], Якушина С.И.[1a]

[1]ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», 302026 Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95.
[a]jakushina_svetlana@rambler.ru

Ключевые слова: адгезия, антиадгезия, потенциальное взаимодействие, сплошная среда

Существуют ситуации, когда необходимо исключить возникновение адгезии (слипания) элементов какой-либо конструкции в процессе ее эксплуатации или налипания одних материалов на твердую поверхность элементов конструкций из других материалов. Один из способов – использование антиадгезионных слоев или покрытий. В настоящее время промышленность использует целый ряд экспериментально проверенных материалов с подобными свойствами: тальк, дисульфид молибдена, фторопласт и т. д. При этом критериев, с помощью которых можно теоретически предсказать адгезионные или антиадгезионные свойства определенной пары материалов, нет. Данная работа посвящена частичному решению проблемы построения таких критериев для линейно упругих материалов, с использованием модели, в рамках которой учитываются парные и тройные потенциальные взаимодействия частиц взаимодействующих материалов на конечных расстояниях.

Введение. Предлагается элементарный анализ условий, при которых между однородными, изотропными упругими материалами может возникнуть адгезия (прилипание), а может и не возникнуть (антиадгезия). В результате предложен критерий, которому должны удовлетворять модули Юнга и сдвига контактирующих материалов, как

при их адгезии, так и при ее отсутствии. Результаты использования критерия подтверждены известными экспериментальными данными.

Теоретические положения. Сплошная упругая среда является математической моделью реальных материалов с их дискретной атомно-молекулярной структурой. Для этой структуры характерно нелокальное потенциальное взаимодействие слагающих их частиц. Потенциальная энергия взаимодействия всех частиц, составляющих исследуемое тело, представляется суммой потенциальных энергий всех парных, тройных и т.д. взаимодействий. В работах [1 - 4] это свойство аксиоматически перенесено на взаимодействие частиц сплошной упругой среды. Роль частиц играют бесконечно малые части $dB_{(\alpha)}$ каждого из тел $B_{(\alpha)}$. Они получаются при мысленном разбиении $B_{(\alpha)}$ на элементарные части, используемом при построении интегральных сумм в вычислениях аддитивных характеристик состояния материала сплошного тела $B_{(\alpha)}$.

Также как и для дискретных систем, потенциалы парных и тройных взаимодействий частиц сплошной среды описываются эмпирическими функциями с параметрами, характерными для исследуемого материала или пары материалов. Эти функции отвечают условиям термодинамичности [6], что достигается их быстрым стремлением к нулю с ростом расстояния между любой парой взаимодействующих частиц, а также допущением о пропорциональности потенциала n - частичного взаимодействия произведению объемов всех n взаимодействующих частиц. Потенциалы парных и тройных взаимодействий, учетом которых ограничились в данной работе, таковы, что для частиц одного и того же однородного тела при его малых деформациях возникают только возвращающие тело в недеформированное состояние силы. Так что система частиц, слагающих тело, устойчива. Это связано с наличием или отсутствием адгезии между этими телами.

Слипание тел $B_{(1)}$ и $B_{(2)}$ при адгезии, означает, что суммарная сила их взаимодействия является силой притяжения. Значит силы, действующие на каждую из частиц $dB_{(1)}$, либо все являются силами притяжения к телу $B_{(2)}$, либо силы отталкивания, действующие на часть частиц $dB_{(1)}$, оказываются меньше сил притяжения, действующих на другую часть этих частиц. Возможна ситуация, когда частицы поверхностного слоя тела $B_{(1)}$ отталкиваются от $B_{(2)}$, в то время, как суммарная сила адгезии является силой притяжения. В этом случае тела прижаты друг к другу, но адгезии нет. Причина ситуации в том, что каждая из частиц $dB_{(1)}$ испытывает действие двух типов сил – сил парных взаимодействий и сил тройных взаимодействий. Они могут иметь разные знаки, причем вторые на малых расстояниях могут превысить первые, а с ростом расстояний между частицами убывают быстрее сил парных взаимодействий, которые, начиная с некоторого расстояния, превысят силы тройного взаимодействия.

С учетом этого можно сформулировать необходимое условие отсутствия адгезии (наличия антиадгезии): сила действия одного тела на частицы поверхностного слоя другого тела является силой отталкивания. При этом достаточным условием антиадгезии является выполнение условия о том, что сила действия одного тела на все частицы другого тела является силой отталкивания. На примере анализа одномерного взаимодействия частиц двух полубесконечных тонких цилиндров $B_{(1)}: 0 < x < +\infty$ и $B_{(2)}: -\infty < x < 0$, контактирующих при $x = 0$, построены аналитические выражения, связывающие модули Юнга и сдвига материалов стержней при наличии адгезии между ними, а также выполнении необходимого и достаточного условий антиадгезии. Вид парного и тройного потенциалов межчастичных взаимодействий, определение параметров этих потенциалов через модули Юнга и сдвига, представлено в работах [2- 5]. Выводы о наличии адгезии или антиадгезии проиллюстрированы расчетами для конкретных пар материалов.

Выводы: Проведен расчет силы отталкивания $\sigma_{(12)}$ для пар: Тальк – Cu, Тальк – Fe, Cu – Fe. Для первой пары получено: $\sigma_{(12)}=65\cdot10^9\ N/m^2>0$. Медь отталкивает тальк, адгезии между ними нет. Для второй пары: $\sigma_{(12)}=523\cdot10^9\ N/m^2>0$. Железо отталкивает тальк, адгезии нет. Для третьей пары: $\sigma_{(12)}=-53\cdot10^9\ N/m^2<0$. Медь притягивает сталь, адгезия есть. Величина $\left|\sigma_{(12)}\right|$ в этом случае может рассматриваться как теоретический предел прочности адгезионного соединения. В качестве исходных приняты следующие значения модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν характеристик упругого состояния контактирующих материалов: тальк [9, 10]: $E=0.16\cdot10^{11}\mathrm{N/m^2}$, $\nu=0$; медь [11]: $E=1.10\cdot10^{11}\mathrm{N/m^2}$, $\nu=0.31$; железо [11]: $E=2.12\cdot10^{11}\mathrm{N/m^2}$, $\nu=0.26$. Полученные результаты можно использовать при теоретической проверке наличия или отсутствия адгезии между данной парой материалов. Их можно использовать для подбора материала, обладающего хорошими адгезионными свойствами по отношению к заданному. Полученные выводы соответствуют известным из технической и технологической практики выводам об адгезионном взаимодействии рассмотренных пар материалов.

Литература:

1. Eringen A. C., Nonlocal Continuum Field Theories (Springer, New York–Berlin– Heidelberg, 2002). 376 pp.

2. Шоркин В. С. Модель сплошной упругой среды, основанная на представлении о дальнодействующем потенциальном взаимодействии ее частиц / Под ред. И. А. Кийко, Р. А. Васина, Г. Л. Бровко // Упругость и неупругость. М.: Ленанд, 2006. С. 271 – 282.

3. Шоркин В. С., Фроленкова, Л. Ю., Азаров А. С. Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // Материаловедение. 2011. № 2. С. 2 – 7.

4. Шоркин В. С. Нелинейные дисперсионные свойства высокочастотных волн в градиентной теории упругости // Механика твердого тела. 2011. № 6. С. 104 – 121.

5. Dolgov N.A., Romashin S.N., Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S. A Model of contact of elastic bodies with account for their adhesion // Nanomechanics and Technology: An International Journal. 2015, v. 6, i. 2, pp. 117 – 133.

6. Ruelle, D. Statistical mechanics: Rigorous results [Text] / D. Ruelle. – New York, Amsterdam: Benjamin, 1969. – 219 p.

Adhesion and anti-adhesion conditions

Shorkin V.S.[1], Yakushina S.I.[1a]

[1]Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
[a]jakushina_svetlana@rambler.ru

Keywords: adhesion, anti-adhesion, potential interaction, continuous medium

There are situations when it is necessary to eliminate the occurrence of adhesion (sticking together) of the elements of any structure in the course of its operation or sticking some material on a hard surface structures from other materials. One way is the use of anti-adhesive layers or coatings. Currently, the industry uses a number of experimentally tested materials with similar properties: talc, molybdenum disulfide, polytetrafluoroethylene, etc. At the same time there are no criteria, by means of which it is possible to predict theoretically, adhesive or anti-adhesive properties of a certain couple of materials. This work is devoted to a partial solution of the problem of creation of such criteria for linearly elastic materials, with use of model within which pair and threefold potential interactions of particles of the interacting materials at final distances are considered.

УДК 621.793.74

Влияние режимов плазменного напыления на остаточные напряжения в износостойких покрытиях*

Зверев Е.А.[a], Скиба В.Ю.[b], Вахрушев Н.В.[c], Гаврилов А.К.[d]

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, г. Новосибирск, 630073, Россия
[a]egor_z@ngs.ru, [b]skeeba_vadim@mail.ru, [c]vah_nikit@mail.ru, [d]alegavr2014@yandex.ru

Ключевые слова: плазменное напыление, износостойкое покрытие, остаточные напряжения, высокохромистый чугун

В работе представлены результаты исследования характера влияния режимов плазменного напыления на уровень остаточных напряжений в покрытиях. Одной из причин низкой прочности сцепления покрытий с основой является формирование остаточных напряжений в покрытии. Уровень остаточных напряжений существенным образом зависит от режимов напыления. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в процессе напыления знак напряжений не изменяется. Величина растягивающих напряжений главным образом зависит от температуры нагрева образцов, а наибольшее влияние на нее оказывает ток дуги плазмотрона. Увеличение силы тока приводит к росту температуры основы, что объясняется ростом тепловой мощности плазменной струи. Повышение расхода плазмообразующего газа влечет за собой снижение температуры образцов, поскольку уменьшается теплосодержание плазмы. Увеличение дистанции напыления оказывает схожее воздействие, и ее увеличение приводит к снижению температуры основы.

Введение. Для формирования поверхностных слоев деталей машин с заданными показателями качества в настоящее время применяются самые различные методы упрочнения. Важное место среди них занимает плазменное напыление износостойких покрытий [1-3]. Сочетание покрытия, обладающего высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных свойств, с пластичной, вязкой и трещиностойкой основой является одним из наиболее перспективных направлений развития современной технологии машиностроения, поскольку позволяет получить большой экономический эффект. В общем случае качество покрытий характеризуется следующими показателями: адгезионной прочностью (прочностью сцепления покрытия с основой), когезионной прочностью (прочностью соединения частиц порошка между собой), пористостью, равномерностью толщины покрытия, а также уровнем остаточных напряжений.

Как известно, одной из причин относительно низкой прочности сцепления покрытий с основой является формирование в слое больших остаточных напряжений [4], которые имеют знакопеременный характер (чаще всего они растягивающие). Их возникновение – следствие напыления расплавленных частиц порошка на поверхность детали, обладающую значительно более низкой температурой, различия в коэффициентах теплового расширения, усадки при кристаллизации частиц, деформации и наклепа частиц при ударе с упрочняемой поверхностью. На практике уровень остаточных напряжений существенным образом зависит от режимов напыления и жесткости системы "покрытие-основа". При высокой жесткости основы и большой толщине покрытия напряжения могут привести к образованию трещин в слое или даже к его отслоению от основы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_17.

Цель настоящих исследований – установление характера влияния режимов плазменного напыления на уровень остаточных напряжений в покрытиях.

Методика экспериментального исследования. При измерении величины остаточных напряжений в покрытиях используют разрушающие и неразрушающие методы контроля [5]. Одним из существенных недостатков первой группы методов является то, что при разрушении слоя покрытия возникают дополнительные напряжения. Поэтому при оценке напряженно-деформированного состояния слоя было отдано предпочтение экспериментально-расчетному методу (методу "наращивания"). Метод позволяет достаточно точно определять внутренние напряжения первого рода. При его реализации [4] на плоский образец (длинную, узкую и тонкую пластину толщиной h_2) наносится слой покрытия заданной толщины h_1, в результате чего он деформируется (рис. 1).

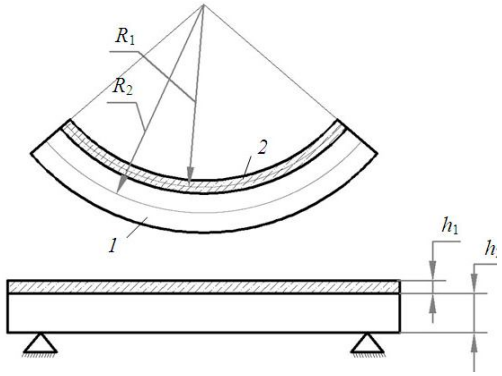


Рис. 1. Схема определения величины остаточных напряжений по прогибу пластины с напыленным слоем: *1* – пластина, *2* – напыленный слой

После измерения радиуса кривизны пластины производили расчет уровня остаточных напряжений $\sigma_{ОН}$ (МПа) по формуле (1), которая учитывает толщину образца и покрытия, а также характеристики упругости их материалов:

$$\sigma_{ОН} = \left[\frac{h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2}{6\rho h_1 (h_1 + h_2)} + \frac{E_1 \left(h_1^3 E_1 + h_2^3 E_2 \right)}{12\rho^2 \left(h_2 E_1 + h_2 E_2 \right)} + \frac{E_1 E_2 h_2 (h_1 + h_2)}{2\rho \left(h_1 E_1 + h_2 E_2 \right)} \right] \frac{1}{1-\mu^2} \cdot 10^{-6}, \qquad (1)$$

где h_1 и h_2 – толщины покрытия и основы, м, в данном случае приняты соответственно $6 \cdot 10^{-4}$ м и $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; E_1 и E_2 – модули продольной упругости покрытия и основы, ГПа, были выбраны по [5] соответственно $10 \cdot 10^9$ Па и $200 \cdot 10^9$ Па; μ – коэффициент пуансона по данным [5] составил 0,26; ρ – средний радиус кривизны, мм, составляет среднее арифметическое значение радиусов R_1 и R_2.

При проведении экспериментов использовалась плазменная установка "Киев-7" с плазмотроном ПУН-8 мощностью 40 кВт. В качестве образцов использовались пластины из стали 20 длиной 130 мм, шириной 10 мм и толщиной 1,5 мм. Материал покрытия – порошок из высокохромистого легированного чугуна марки ПГ-С27 [6]. Глубина слоя покрытия при напылении выдерживалась в пределах 630…650 мкм. При этом контроль глубины слоя осуществляли цифровым контактным толщиномером индукционного типа модели Константа МК3. Перед нанесением покрытий образцы подвергали струйно-абразивной очистке [7]. Измерение температуры нагрева поверхности образцов производили при помощи бесконтактного инфракрасного пирометра модели *Optris MiniSight*.

При поиске модели процесса при прочих равных условиях в качестве управляемых режимных параметров были приняты сила тока дуги плазмотрона I (диапазон варьирования значений – 116…160 А), расход плазмообразующего газа (воздуха) G (13…27 л/мин) и дистанция напыления L (80…160 мм).

За основу построения модели был принят ортогональный центрально-композиционный план второго порядка [8]. В каждой точке плана производилось пять опытов, а результаты определялись по среднему арифметическому значению.

Результаты и обсуждение. Полученные данные обработаны с использованием программных продуктов *STATISTICA* и *TableCurve 3D* [9]. В результате была получена инженерная модель процесса на базе уравнения регрессии (2):

$$\sigma_{\text{ОН}} = 161{,}22 - 3{,}713I + 0{,}018I^2 + 3G - 0{,}099G^2 + 1{,}06L - 0{,}003L^2 - 0{,}004IL. \quad (2)$$

Данная модель позволяет оценить степень влияния каждого из факторов и выявить их взаимосвязь. На рис. 2 показана графическая зависимость уровня остаточных напряжений от силы тока дуги плазмотрона и расхода плазмообразующего газа при дистанции напыления, равной 120 мм.

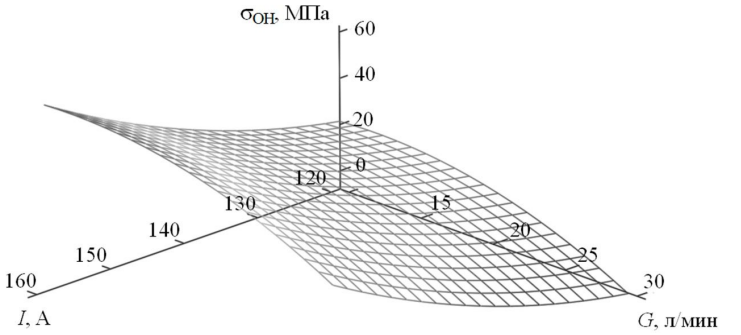


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений в покрытиях от режимов напыления

В результате анализа экспериментальных данных было выявлено, что в процессе напыления знак напряжений не изменяется. Величина растягивающих напряжений главным образом зависит от температуры нагрева образцов, а наибольшее влияние на нее оказывает ток дуги плазмотрона. Увеличение силы тока дуги сопровождается ростом температуры основы. Это объясняется тем, что с увеличением силы тока растет и тепловая мощность плазменной струи. В то же время с повышением расхода плазмообразующего газа наблюдается обратная картина: снижение температуры образцов, поскольку при этом уменьшается теплосодержание плазмы. Практически тоже воздействие оказывает и дистанция напыления: ее увеличение приводит к снижению температуры основы.

В исследуемом диапазоне режимов плазменного напыления покрытий температура нагрева образцов изменялась в интервале значений 240…470 ^{0}C.

Выводы: Экспериментально установлено, что значения уровня остаточных напряжений образцов находятся в пределах 7…60 МПа, при изменении режимов напыления в диапазонах: силы тока дуги плазмотрона I = 116…160А; расхода плазмообразующего газа (воздуха) G = 13…27 л/мин; дистанции напыления L = 80…160 мм.

Известно, что растягивающие напряжения отрицательно сказываются на эксплуатационных свойствах деталей машин и снижают ресурс их работоспособности в целом. Однако с целью обеспечения окончательных геометрической и размерной точности, а также шероховатости поверхностей деталей с напыленными покрытиями их подвергают финишной механической обработке, как правило, шлифованию. При этом происходит не только снижение уровня растягивающих остаточных напряжений, но и формирование сжимающих, что обусловлено упрочнением поверхностного слоя за счет пластической деформации, степень влияния которой зависит от режимов финишной обработки.

Литература:

1. Fauchais P.L., Heberlein J. V.R., Boulos M.I. Thermal Spray Fundamentals. New York, Springer US Publ., 2014. 1566 p. doi: 10.1007/978-0-387-68991-3. Print ISBN 978-0-387-28319-7.

2. Исследование химического состава плазменных покрытий из никель-керамической порошковой смеси / В.В. Иванцивский, Е.А. Зверев, Н.В. Вахрушев, А.Н. Бредихина // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 35-39.

3. Определение режимов финишного шлифования при обработке износостойких плазменных покрытий / Е.А. Зверев, В.Ю. Скиба, Н.В. Вахрушев, А.Н. Бредихина // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2016. – Т. 2. – С. 36-39.

4. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 357 с.

5. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
6. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Плохов А.В. Эксплуатационные свойства плазменных покрытий из износостойкого порошкового материала марки ПГ-С27 // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 2 (47). – С. 8-12.
7. Зверев Е. А. Влияние режимов струйно-абразивной обработки на шероховатость поверхности деталей под плазменное напыление // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2008. – № 2 (52). – С. 109-114.
8. Чёсов Ю.С., Зверев Е.А., Трегубчак П.В. Технологическое обеспечение качества плазменных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1 (54). – С. 10-13.
9. Integrated quality ensuring technique of plasma wear resistant coatings / V.Y. Skeeba, E.A. Zverev, N.V. Martyushev, P.Y. Skeeba // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 132-137.

Influence of plasma spraying conditions on residual stresses in the wear-resistant coatings

Zverev E.A.[a], Skeeba V.Yu.[b], Vakhrushev N.V.[c], Gavrilov A.K.[d]

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, RussianFederation
[a]egor_z@ngs.ru, [b]skeeba_vadim@mail.ru, [c]vah_nikit@mail.ru, [d]alegavr2014@yandex.ru

Keywords: plasma spraying, wear-resistant coating, residual stresses, high-chromium cast iron

Research results of influence of plasma spraying conditions on the level of residual stresses in coatings are presented in this paper. One of the reasons of low coatings adhesion strength is the formation of residual stresses in the coating. The residual stresses level significantly depends on the spraying conditions. Analysis of the obtained experimental data shows that the stress sign does not change during the spraying process. The magnitude of the tensile stresses mainly depends on the heating temperature of samples, and the arc current of plasma torch has the greatest influence on it. Increasing amperage results in an increase the substrate temperature that is explained by the increasing in thermal power of plasma jet. Increase in the plasma-forming gas consumption entails the decrease in sample temperature, since the plasma heat content decreases. Increase of spraying distance has a similar effect, and its increase entails the decrease in substrate temperature.

УДК 621.785.532

Моделирование микротвердости по структуре диффузионных зон покрытий

Маркова Е.В., Чечуга О.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
marta06@yandex.ru

Ключевые слова: микротвердость, дисперсность, диффузионные зоны, карбонитридный слой

В статье рассмотрены вопросы формирования диффузионной зоны при создании термодиффузионного покрытия на стали. Проведено моделирование микротвердости диффузионных зон на основе конкретного комплекса их структурных характеристик. Предложена схема моделирования распределения микротвердости по глубине диффузионных зон. Проведена оценка адекватности полученной модели твердости экспериментальным результатам с достаточно хорошей точностью. Получены соответствия между температурой насыщения и толщиной диффузионного слоя в ходе исследований распределения микротвердости по глубине азотированных слоев в зависимости от температуры и времени обработки. Наиболее равномерное падение твердости отмечено в сталях, содержащих повышенное количество хрома и ванадия, что позволило при прочих равных условиях получить эффективную глубину диффузионного слоя. Показано существование количественной связи между микротвердостью диффузионных зон и характеристиками их структурной гетерогенности.

В результате никотрирования под карбонитридным γ' - или (γ'+ε) - слоем формируется диффузионная зона, представляющая собой многофазную структуру, состоящую из азотистого твердого раствора основного металла, его нитридов и карбонитридов, а также химических соединений легирующих элементов.

Распределение и дисперсность упрочняющих нитридных и карбонитридных фаз является многопараметрической функцией и зависит от: концентрации нитридообразующих легирующих элементов в сталях (влияет на размер частиц); термодинамического потенциала образования нитридов (влияет на дисперсность частиц); диффузионной подвижности легирующих элементов (влияет на размер частиц). Формирование дисперсных частиц в диффузионных зонах возможно по двум механизмам [1].

Для случая легирования сталей элементами Cr, Mo, Mn, W и др. образование вторых фаз осуществляется при взаимновстречной диффузии азота-углерода и легирующих элементов, не связанных в карбиды [1]. Очевидно, что данный механизм наиболее просто реализуется по различным дефектам кристаллической решетки путем кластерных накоплений. Так как формирование кластеров элементов замещения требует затрат времени, этот вариант упрочнения является длительным.

Второй механизм предусматривает образование нитридов из карбидов основного и легирующих элементов, подчиняющихся в основном стехиометрическому составу MeC (элементы Ti, Zr, Hf и т.д.) [1]. Основной вариант такого механизма: нитрид формируется уже на готовом скоплении легирующего элемента карбида, не требует дополнительной диффузии атомов замещения. Такой механизм может реализоваться в результате прямой реакции азота с карбидом с образованием соответствующего переходного карбонитрида, и, наконец, после полного оттеснения углерода, и нитрида Me_mN_n. Кинетика процесса сводится к постепенному замещению углерода азотом согласно схеме

$$Me_aC_B+N \rightarrow Me_a(C,N)_B \rightarrow Me_m(N,C)_n \rightarrow Me_mN_n \qquad (1)$$

Схема (1) возможна для элементов V, Nb, Zr, Ti и т.д. вследствие однотипности решеток кристаллитов и полной взаимной растворимости соответствующих карбидов и нитридов. Чем выше концентрация легирующих элементов в твердом растворе, тем больше вероятность образования нитридов по твердорастворному механизму.

Многочисленными исследованиями было показано, что определяющие свойства диффузионных зон в значительной степени влияют на работоспособность никотрированных слоев на сталях [2]. Твердость зон внутреннего азотирования зависит от концентрации примесей внедрения в твердом растворе, а также природы и морфологии распределения упрочняющих нитридных и карбонитридных фаз. Высокая твердость и прочность диффузионных зон достигается у сплавов, легированных нитридообразующими элементами. Выделение из твердого раствора дисперсных частиц вторых фаз затрудняет движение дислокаций и пластическую деформацию.

Варьирование температурой и продолжительностью насыщения позволяет фиксировать в диффузионной зоне различные стадии процесса выделения и, следовательно, разный уровень твердости. Максимальное упрочнение конструкционных сталей достигается в том случае, когда в диффузионной зоне образуются однотипные по азоту предвыделения, полностью когерентные с решеткой твердого раствора. При повышении температуры процесса более 580°С твердость снижается вследствие коагуляции нитридов и нарушения когерентности. Высокая твердость диффузионных зон "обязана" не только процессам предвыделения и образования нитридов, но и большой растворимостью азота в феррите, легированном переходными металлами [3]. Последнее предопределяет получение высокого уровня искажений, релаксация которых ниже порога рекристаллизации затруднена.

Исследования распределения микротвердости по глубине азотированных слоев в зависимости от температуры и времени обработки показали что, чем выше температура насыщения, тем больше при прочих равных условиях толщина диффузионного слоя и более равномерно падение твердости по его сечению. Повышение степени диссоциации аммиака до 60 % не влияло на характер кривой распределения. Наиболее равномерное падение твердости

отмечается в сталях, содержащих повышенное количество хрома и ванадия. Это позволяет при прочих равных условиях получать большую эффективную глубину диффузионного слоя.

Весьма важными являются вопросы моделирования микротвердости диффузионных зон на основе конкретного комплекса их структурных характеристик. Можно предложить следующую схему моделирования распределения микротвердости по глубине диффузионных зон:

Этап 1 – определяется или рассчитывается (на основе диффузионных законов в конкретных сталях) распределение концентрации азота по глубине диффузионного слоя при заданном технологическом режиме.

Этап 2 – вычисляется плотность выделившихся дисперсных частиц по глубине упрочненного слоя.

Этап 3 – определяется распределение средних размеров частиц в сечениях карбонитридного слоя.

Этап 4 – рассчитывается распределение прироста предела текучести по толщине диффузионной зоны.

Этап 5 – определяется прирост поверхностной твердости азотированного слоя.

Этап 6 – окончательно вычисляется распределение твердости по глубине диффузионной зоны для заданного технологического режима насыщения.

По этапу 2 расчетной модели количество выделившихся нитридов $N_ч$ в заданном сечении диффузионной зоны принимается в виде линейной функции от концентрации азота:

$$N_ч = N_ч^{\max} \cdot \frac{|N| - |N|_y}{|N|_{\max} - |N|_y} \text{ (на 1 см}^3\text{ объема)} \qquad (2)$$

где $|N|$ – текущая концентрация азота в заданной координате слоя; $|N|_{\max}$ – максимальная растворимость азота в стали; $|N|_y$ – концентрация азота на эффективной границе азотированного слоя. В качестве последней принимается толщина слоя $У_{д.з}$, в котором прирост твердости слоя по сравнению с сердцевиной составляет ΔH≈1000 МПа

$$У_{д.з} = (3{,}44 \cdot g_c^{\,3} - 1{,}35 \cdot g_c^{\,2} - 6{,}04 \cdot g_c - 0{,}33) \cdot \sqrt{D \cdot \tau}\,, \qquad (3)$$

где g_c – приведенная свободная энергия процесса нитридообразования; D – коэффициент диффузии азота в α-фазе; τ – продолжительность процесса.

Для каждого легирующего элемента величина $N_ч^{\max}$ определяется по формуле:

$$N_ч^{\max} = \frac{C_0}{m} \cdot A \cdot 10^{\frac{\beta}{T}}, \qquad (4)$$

где C_0 – концентрация легирующего элемента в твердом растворе (%, ат); m – молекулярная масса элемента; T – температура процесса; A и β - константы для каждого из легирующих элементов. Расстояние между центрами дисперсных частиц нитридов рассчитываются согласно выражению:

$$d = \frac{1}{\sqrt[3]{N_ч^{\max}}}. \qquad (5)$$

По этапу 3 расчетной модели определяется радиус выделившихся частиц, соответствующий заданным технологическим режимам насыщения и химическому составу сталей:

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{D^*}{\tau} \cdot \frac{C_0 - C_e}{C - C_e} - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot D^* \cdot r^3 \cdot N_ч^{\max}\,, \qquad (6)$$

где C и C_0 – исходная концентрация легирующего элемента в твердом растворе и в нитриде соответственно; C_e – концентрация азота на границе "выделение – твердый раствор". В качестве эффективного коэффициента диффузии легирующих элементов D^* принимается так называемое значение средневзвешенного коэффициента по атомной доле в соответствии с химическим составом стали.

По этапу 4 прирост предела текучести в зоне внутреннего азотирования $\Delta\sigma_T$ легированных сталей определяется как сумма эффектов упрочнения дисперсными частицами $\Delta\sigma_{Д.Ч}$ и твердорастворного упрочнения $\Delta\sigma_{T.P}$

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_{T.P} + \Delta\sigma_{Д.Ч} = 467 \cdot C_N + \frac{22470}{d-D} \cdot \lg\frac{d-D}{5} \quad (7)$$

Зная распределение азота по глубине диффузионной зоны C_N и геометрические параметры выделившихся нитридных частиц (d и D) возможно рассчитать изменение прочности по толщине карбонитридного слоя.

По этапу 5 при расчете микротвердости поверхности, или, что все равно, карбонитридного слоя, установлена ее зависимость от некоторого безразмерного комплекса "g_c", нормируемого свободной энергией образования нитридов основы и легирующих элементов ΔG_0

$$g_c = \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta G_0}{RT} = \sum_{i=1}^{m} \frac{N_i}{X_i} \cdot g_i \quad (8)$$

где n_i – молярная доля i-го легирующего элемента из "m"-легирующих конкретный сплав; X_i – стехиометрический коэффициент в формуле (8). Молярная доля N, связана с концентрацией i-го элемента C_i по формуле

$$N_i = \frac{C}{100 \cdot \sum_j C_j \cdot (M_{Fe} / M_i)} \quad (9)$$

где M – молекулярная масса. В соответствии с известной зависимостью $\Delta G_0 = a + вT$ комплексный параметр g_i может быть представлен в виде двучлена:

$$g_i = a_i + \frac{B_i}{T} \quad (10)$$

Используя данные по значениям расчетных коэффициентов "a" и "B" для основных типов нитридов хрома, молибдена, железа, ванадия, вольфрама и т.п. определяется поверхностная микротвердость карбонитридного слоя.

По этапу 6 распределение твердости по глубине диффузионного слоя $(HV)_y$ рассчитывается исходя из прироста предела текучести на поверхности $(\Delta\sigma_T)_{уп}$ и на заданной глубине зоны внутреннего азотирования $(\Delta\sigma_T)_y$ по следующим зависимостям:

$$(\Delta HV)_y = \Delta HV_П \cdot \frac{(\Delta\sigma_T)_y}{(\Delta\sigma_T)_{уП}} \quad (11)$$

$$HV_y = HV_0 + (\Delta HV)_y, \quad (12)$$

где HV_0 – твердость сердцевины; $(\Delta HV)_П$ – изменение твердости на поверхности.

Проведенные с использованием уравнений (2)…(12) оценки адекватности описанной модели твердости экспериментальным результатам показали достаточно хорошую ее точность. В то же время, следует заметить, что для сложнолегированных сталей, к которым относятся и рассматриваемые, модельные расчеты должны быть несравненно более сложными и, соответственно, менее точными.

Однако, с практических позиций важность данного подхода состоит в другом. Именно этим доказывается существование количественной связи между микротвердостью диффузионных зон и характеристиками их структурной гетерогенности. Это предполагает возможность постановки обратной задачи - по измеренным распределениям микротвердости оценивать структуру диффузионных зон с целью разработки моделей и критериев оценки эксплуатационных свойств и, в том числе, контактную выносливость и усталостную прочность.

Литература:

1. Нечаев Л.М., Сержантова Г.В., Маркова Е.В. Моделирование характеристик гетерогености диффузионных зон по показателям микротвердости // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 6. Тверь: ТГТУ, 2013. С. 129-134.

2. Нечаев Л.М., Фомичева Н.Б., Иванькин И.С. Определение параметров трещиностойкости никотрированных сталей // Современные наукоемкие технологии, 2007. №5. С.89-92.

3. Ondracek G. Zurquantitativen Gefüge-Feldeigenschafts-Korrelation mehrhasiger Werkstoffe Teil I, II, III (О количественной корреляции между свойствами и структурой многофазных материалов, Часть I, II, III). // Metall. 1982. Vol. 36. № 12. P. 1288-1290.

Simulation of the microhardness on the structure of diffusion zones coatings

Markova E. V., Chechuga O.V.

Tula state University
marta06@yandex.ru

Keywords: microhardness, degree of dispersion, diffusion zone, carbonitride layer

The paper considers diffusion zone formation as a thermal diffusion coating is applied to steel. The micro hardness of the diffuse areas has been simulated using a set of their specific properties. An approach to micro hardness distribution over the diffuse zone depth simulation has been proposed. The hardness distribution model has been verified against experimental data; the model accuracy is substantially good. The saturation temperature vs. diffuse layer thickness relations have been identified through studying micro hardness distribution over the nitrated layer depth for various treatment temperatures and periods. The most uniform hardness reduction has been found in steels with elevated Cr and V content. It has enabled to determine the efficient diffuse layer depth for the same conditions. A quantitative relation between diffusion zone micro hardness and their structural heterogeneity properties has been identified.

УДК 539.3

Структурная гетерогенность как условие формирования малых трещин в покрытии

Нечаев Л.М., Фомичева Н.Б., Сержантова Г.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
nbf62@yandex.ru

Ключевые слова: квазихрупкая структура, покрытие, трещина, уровень напряжений, структурный дефект

В работе проведен анализ кинетической диаграммы усталостного разрушения, связывающей скорость роста трещины и коэффициент интенсивности напряжений цикла для термодиффузионных покрытий. Получены данные по росту малых трещин в гетерогенных структурах. Выявлено влияние частиц фаз при высоких напряжениях на формирование трещин. Отмечено, что в слоях, имеющих наибольшую степень гетерогенности, при высоких напряжениях возможен наиболее динамичный старт трещины. При последующем увеличении амплитуды напряжения наблюдается замедление движения трещин по глубине покрытия. Проведена оценка влияния гетерогенности на трещинообразование материала покрытия. Микромеханика малых трещин представлена с учетом зависимости скорости роста трещин от произведения амплитуды напряжения на корень квадратный из длины трещины. Получено, что замедление трещин происходит более эффективно в гетерогенных слоях с большим количеством частиц второй фазы.

Процессы изнашивания в рамках усталостного механизма повреждаемости предопределяются эффектами формирования микро- и макротрещин. Особенностью кинетики распространения трещин в квазихрупких структурах является то, что она реализуется с предельно высокими скоростями. Перемещение трещины происходит под действием нормальных к плоскости трещины сжимающих и растягивающих напряжений.

Кинетика роста микротрещины определяется следующими фазами: старт распространения дефекта, перестройка микропластической зоны из объемной в характерную для ква-

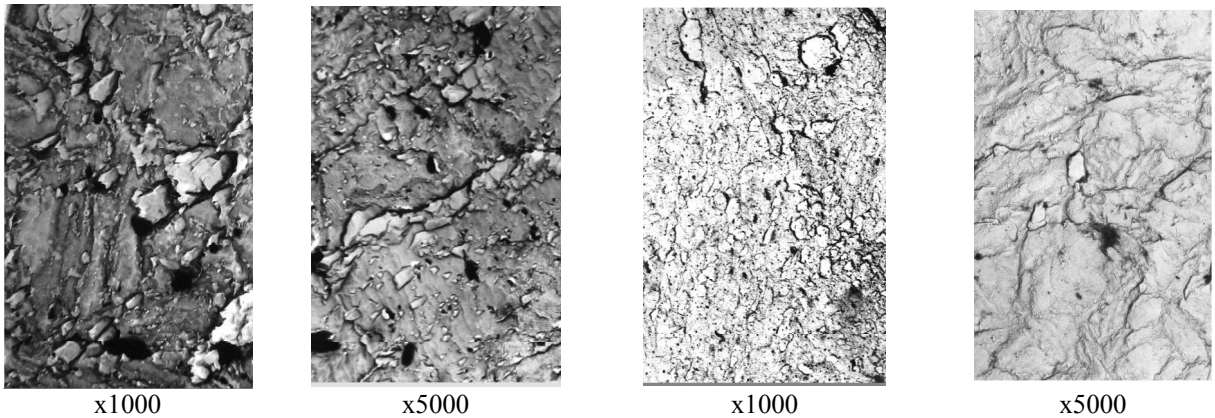
зихрупкого разрушения плоскую; дальнейшее ускорение трещины; образование малых трещин и т.п. [1,2].

На процесс формирования трещины и на кинетику ее распространения оказывают влияние макронапряжения [3]. Так называемые малые трещины в зависимости от действующего уровня напряжений могут распространяться и перерастать в длинные. С другой стороны, существует такой уровень напряжений, при котором трещина не обладает способностью к распространению. Критический размер неустойчивой малой трещины $l_{кр}$ соизмерим с эффективной глубиной диффузионной зоны. На внутренней границе эффективной диффузионной зоны слоя любого типа формируются, в основном, дисперсные частицы размерами 0,04...0,05 мкм, объем которых достигает 20%. Этот своеобразный "запирающий слой" залегает на различных глубинах в зависимости от продолжительности насыщения. Последнее доказывает, что параметр $l_{кр}$ является структурночувствительной величиной, определяемой типом слоя.

Время существования малой трещины, выраженное параметром $N_{кр}$, определяется также гетерогенностью диффузионной зоны, и ее изменение может быть связано с приложенным напряжением.

При малых напряжениях малая трещина развивается с ускорением по глубине диффузионных зон слоев любой гетерогенности. При этом надо отметить, что чем выше гетерогенность, тем больше стартовая скорость. С увеличением напряжения и плотности частиц второй фазы скорость старта трещин с поверхности возрастает. Причем в слоях, имеющих наибольшую гетерогенность, при высоких напряжениях дефекта возможен наиболее динамичный старт с последующим (на глубине 20 мкм) резким торможением. При последующем увеличении амплитуды напряжения наблюдается замедление движения трещин по глубине покрытия. С повышением степени структурной гетерогенности зона с максимальной скоростью дефекта переносится вглубь диффузионной зоны на глубину 120…140 мкм. При этом, чем больше размер дисперсных частиц второй фазы (0,04…0,05 мкм), тем активнее торможение осуществляется на стадии развития трещины.

Таким образом, частицы второй фазы играют двоякую роль: крупные включения размерами 0,1…0,2 мкм являются концентраторами напряжений, способствуя разрушению, мелкие же величиной 0,04…0,05 мкм играют роль стопоров (рис.1).



x1000 x5000 x1000 x5000

а) *б)*

Рис. 1. Изменение микроструктуры по глубине никотрированного слоя, *а* – 10 мкм; *б* – 45 мкм

На это указывает тот факт, что с увеличением плотности и размеров частиц трещины ускоряются, причем кинетический параметр $V_{тр}$ предопределяется уровнем действующих напряжений.

Отчетливо проявляется влияние частиц фаз при высоких напряжениях. Трещины стартуют с высокой скоростью от поверхности в любом по гетерогенности слое, так как в приповерхностной диффузионной зоне существует достаточно высокая плотность крупных частиц, играющих роль концентраторов напряжений. По мере развития трещина начинает тормозиться, и это обусловлено частицами-стопорами.

Таким образом, одним из необходимых условий формирования малых трещин является структурная гетерогенность. Уровень же внешних напряжений предопределяет условия для развития и перерастания малых трещин в магистральные или же для их перехода в разряд нераспространяющихся.

Длинные трещины при своем развитии в малой степени реагируют на гетерогенность материала, хотя в общем случае частицы как концентраторы способствуют их росту. Стартовые скорости малых трещин от поверхности при невысоких напряжениях находятся ниже или на уровне параметра V_{mp} для длинных трещин. Однако, по мере возрастания напряжения скорость малых дефектов может повышаться. Это, по-видимому, связано с фактором "многоочаговости" разрушения за счет отвода энергии на немагистральные дефекты, а также ветвления трещин.

Микромеханика малых трещин может быть представлена с учетом зависимости скорости роста трещин от произведения амплитуды напряжения на корень квадратный из длины трещины. Не распространяющиеся трещины при малой гетерогенности слоя покрытия стартуют с высокой скоростью. Затем, однако, они замедляют свой рост и, наконец, останавливаются. Пороговым условием распространяющихся и нераспространяющихся трещин является амплитуда напряжения уровня 250 МПа. Причем максимальная длина нераспространяющихся трещин соизмерима с эффективной глубиной диффузионной зоны.

Замедление трещин происходит более эффективно в гетерогенных слоях с большим количеством частиц второй фазы, так как в них отмечается более высокая плотность структурных стопоров. Распространяющиеся малые трещины могут стартовать со скоростью меньшей, чем нераспространяющиеся, но более высокая амплитуда напряжений (свыше 250 МПа) позволяет им трансформироваться в магистральные дефекты.

Согласно диаграмме усталости, распространяющиеся трещины в диффузионной зоне растут более медленно. Это связано с тем, что подрастание малых трещин до критического размера происходит на глубинах, в которых прекращают свое существование нераспространяющиеся дефекты.

Литература:

1. Нечаев Л.М., Фомичева Н.Б., Иванькин И.С. Определение параметров трещиностойкости никотрированных сталей // Современные наукоемкие технологии, 2007. №5. С.89-92.

2. Dagani,R. Individual Surface Atoms Identified,Chemical & Engineering News/ R.Dagani//5 March 2007,Published by American Chemical Society.P.13

3. Староконь И.В. Кинетика усталостного трещинообразования основных конструктивных элементов и сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1.

Structural heterogeneity as the condition for the formation of small cracks in the coating

Nechaev L.M., Fomicheva N.B., Serzhantova G.V.

Tula State University
nbf62@yandex.ru

Keywords: quasi-brittle structure, the coating, the crack, the stress level, the structural defect

The paper presents an analysis of a kinetic fatigue fracture diagram representing a relation between crack growth rate and cyclic stress intensity factor in thermal diffuse coatings. Small crack growth rates in heterogeneous structures have been estimated. The effects of phase particles on crack formation under high stresses have been identified. It has been found that under high stress fast crack launch occurs in the most heterogeneous layers. As the stress amplitude further increases, crack propagation across the coating depth slows down. The effects of heterogeneity on crack formation in the coating have been studied. The micro mechanics of small cracks is represented taking into account the crack propagation rate vs. the product of stress amplitude and square root of the crack length relation. It has been found that crack propagation is more inhibited in heterogeneous layers with a large second phase particle content.

УДК 624.042

Раскрытие статической неопределимости в симметричных стержневых конструкциях с учетом податливости связей

Горунович С.Б.

У-ИТЭЦ ПАО «ИРКУТСКЭНЕРГО», г. Усть-Илимск, Россия
Gorunovich@rambler.ru

Ключевые слова: симметричная стержневая конструкция, статическая неопределимость

В данном исследовании изложена краткая характеристика существующих способов раскрытия статической неопределимости в стержневых конструкциях. Подчеркнута проблема сложности существующих аналитических расчетов и зависимость результатов от принятых расчетных моделей. Выявлено, что одним из факторов, влияющим на совершенство расчетных моделей, является учет податливости связей. Приведен альтернативный способ раскрытия статической неопределимости на примере расчета на прочность стержневой конструкции, работающей на растяжение, с учетом податливости связей. Выявлена зависимость величин реакций в статически неопределимых, симметричных, стержневых конструкциях (включая балки при продольно-поперечном изгибе) от расстояния до точки приложения силы. Также определен характер зависимости величин реакций от податливости связей. Зависимости подтверждены расчетными примерами. Подчеркнута актуальность предложенного упрощенного метода с приведением примеров более сложных конструкций. Получен вывод о возможности использования альтернативного способа раскрытия статической неопределимости в симметричных стержневых конструкциях при растяжении и изгибе. Подчеркнута необходимость дальнейшего исследования упрощенных способов прочностных расчетов с учетом податливости связей.

Известно, что существующие методы для раскрытия множественной статической неопределимости в стержневых конструкциях (метод сил, метод перемещений) являются достаточно громоздкими и трудоемкими. Например, система канонических уравнений для общего случая n-раз статически неопределимой упругой системы имеет вид:

$$\begin{cases} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + ... + \delta_{1n}x_n + \Delta_{1p} = 0; \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + ... + \delta_{2n}x_n + \Delta_{2p} = 0; \\ \quad ... \\ \delta_{n1}x_1 + \delta_{n2}x_2 + ... + \delta_{nn}x_n + \Delta_{np} = 0. \end{cases}$$

Коэффициенты δ_{ij} представляют собой перемещения по направлению i-силового фактора под действием j-единичного фактора, определяются с помощью достаточно громоздких интегралов Мора. Коэффициенты Δ_{ij} учитывают действие силовых факторов и также определяются с помощью интегральных выражений.

Система канонических уравнений метода перемещений имеет схожую структуру (система линейных уравнений), но в качестве неизвестных x_i предлагает перемещения. Коэффициенты при неизвестных представляют собой уже реакции, которые определяются в процессе также достаточно трудоемких процедур.

Метод перемещений по своей логике и структуре находится ближе к общеизвестному методу конечных элементов (МКЭ) – наиболее распространённому, универсальному и общепринятому методу расчетов на прочность. Во всех вышеперечисленных методах податливости связей могут быть учтены [1]. В виду сложности, МКЭ используется, как правило, в программных комплексах («машинный» метод). При этом часто применяют итерационный и пошаговый способ, суть которого заключается в последовательном уточнении жесткостных характеристик узлов и искомых компонентов НДС конструкции [1, 2]. МКЭ используется для решения задач, как в статической, так и в динамической постановке [4].

Как отмечено в [2], на всех стадиях проектирования многоэтажного здания, включая моделирование каркаса в расчетных программных комплексах, важно учитывать фактор по-

датливости стыка, значение которого не только количественно, но и качественно изменяет перераспределение усилий в элементах несущей системы конструкции.

Целью исследования явилась выработка альтернативного, ручного инженерного метода раскрытия статической неопределимости с удовлетворительной погрешностью с учетом податливостей связей. Разработанный метод должен также служить в качестве вспомогательного к сложным «машинным» методам, что позволит исключить грубые ошибки в процессе внесения и обработки данных в программных комплексах.

При рассмотрении равновесия любой простейшей статически определимой системы (например, шарнирно опертой балки, загруженной сосредоточенной силой) можно прийти к выводу, что значения реакций опор обратно пропорциональны расстояниям до точки приложения силы. При этом направления силовых факторов можно учесть интуитивно (реакции и приложенная сила – параллельны и разнонаправлены).

При определении реакций связей в статически неопределимых симметричных стержневых системах подверглось проверке следующее предположение – реакции в статически неопределимых симметричных стержневых системах обратно пропорциональны квадрату расстояния до точки приложения силы и прямо пропорциональны жесткости (при изгибе), удельной жесткости (при растяжении/сжатии).

Симметрия в статически неопределимых конструкциях явление достаточно распространенное. Случайная асимметрия может возникать как результат погрешностей монтажа или привязки к существующим фундаментам или конструкциям. Множественно статически неопределимые, симметричные системы встречаются как в строительной практике, так и в машиностроении. Актуальными примерами может служить мачта с раскосами или растяжками (в строительной отрасли), см. рис.1, или кронштейн с болтовым креплением по периметру (для машиностроения), см. рис.2.

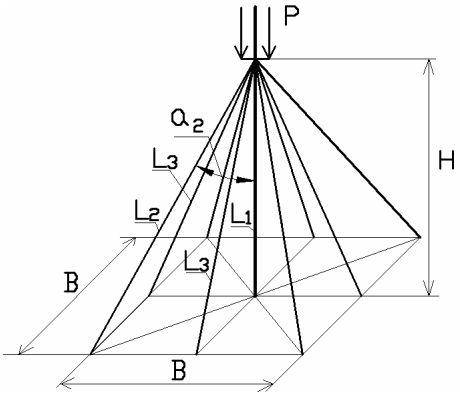


Рис.1. Мачта с подкосами (растяжками)

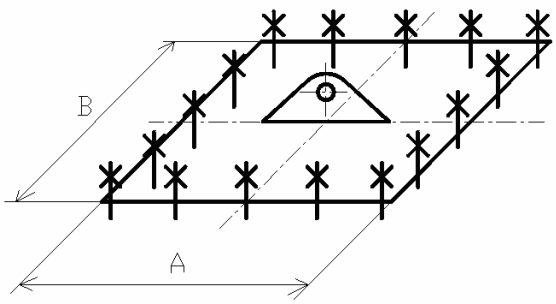


Рис.2. Кронштейн с болтовым креплением

Согласно вышесказанному, неизвестные реакции N_{yi}, $i = 1, 2\ldots n$, можно определить из системы уравнений:

$$\begin{cases} N_{yi} = kPc_i / L_i^2, \quad i = 1,2...n; \\ \sum_{i=1}^{n} N_{yi} = P, \end{cases} \tag{1}$$

где L_i – расстояния от точки приложения соответствующих i-тых реакций до точки приложения силы P;

k – коэффициент пропорциональности, подлежащий определению; c_i – жесткость (величина обратная податливости) на единицу длины i-той связи – удельная жесткость. В данном случае (растяжение/сжатие): $c_i = E_i F_i$.

Здесь E_i – модуль упругости i-той связи; F_i – площадь сечения i-той связи.

Примером симметричной статически неопределимой системы, работающей на изгиб, может служить эстакада технологических трубопроводов, рис.3, 4.

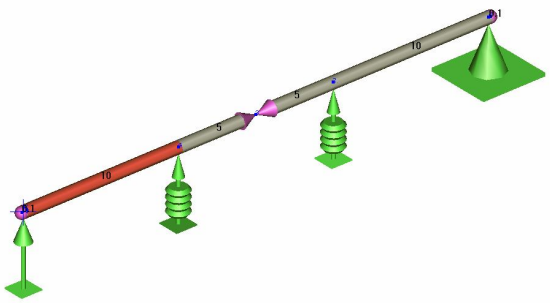


Рис.3. Участок технологического трубопровода (в программе СТАРТ-PROF 4.61)

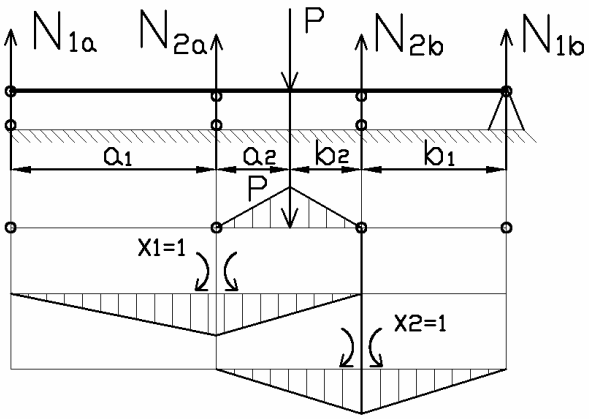


Рис.4. Расчетная модель симметричной конструкции – участка технологических трубопроводов, работающей на изгиб (метод сил)

Согласно (1), неизвестные реакции в опорах трубопроводов N_{ia}, N_{ib}, i = 1, 2 можно определить по формулам:

$$N_{2a} = P\left[\left(\frac{b_2^2(b_1+b_2)^2(a_1+a_2)^2 c_{2a}}{c_{2a}b_2^2(b_1+b_2)^2(a_1+a_2)^2 + c_{2b}a_2^2(b_1+b_2)^2(a_1+a_2)^2 - c_{1a}a_2^2b_2^2(b_1+b_2)^2 - c_{1b}a_2^2b_2^2(a_1+a_2)^2}\right)\right] + q(a_2+0{,}5a_1)$$

(2)

$$N_{1a} = -\left[\left(\frac{N_{2b}b_1 - P(b_1+b_2) + N_{2a}(b_1+b_2+a_2)}{(a_1+a_2+b_1+b_2)}\right)\right] + q\frac{a_1}{2}.$$

Формулы для определения реакций N_{ib}, i = 1, 2, очевидно, можно записать, заменив индекс/переменную a на b. Последним слагаемым в выражениях (при q) учтено влияние равномерно-распределенной нагрузки q (вес среды и материала труб с изоляцией).

Жесткость c_{ia}, c_{ib}, i = 1, 2 (обратную величину податливости) при изгибе следует определять как составную – состоящую из жесткости как самой трубы, так и опорных конструкций (связей):

$$c_{ia} = \frac{c_{ia}^{tr} \cdot c_{ia}^{h}}{(c_{ia}^{tr} + c_{ia}^{h})},\ i{=}1{,}2;$$

где $c_{ia}^{tr} = \frac{E \cdot J_x^{tr}}{a_i^3}$ – жесткость участка трубы a_i. Здесь J_x^{tr} – осевой момент инерции сечения трубы; c_{ia}^{h} – жесткость опорной конструкции.

Проверка приведенных формул производилась сравнением с точными решениями, полученными методом сил и МКЭ в программной среде СТАРТ-PROF 4.61. Получено, что данное решение совпадает с точным, в случае c_{ia}= c_{ib}=1, i = 1, 2 (жесткость опор не учитывается). Учет жесткости опор приводит к погрешности 10 - 20%.

Практическая ценность, полученных на оснований вышеозвученных формул, возрастает из-за возможности учитывать незначительную асимметрию с удовлетворительной погрешностью [3].

В результате исследования получены следующие выводы:

а) решение, полученное из предположения об обратной пропорциональности реакций квадрату расстояния до точки приложения силы, в статически неопределимых, симметричных стержневых системах, при растяжении/сжатии и изгибе, совпадает с точным и может широко использоваться на практике;

б) решение, полученное из предположения о пропорциональности реакций удельной жесткости связей, в статически неопределимых симметричных стержневых системах, при растяжении/сжатии совпадает с точным и может широко использоваться на практике;

в) решение, полученное из предположения о пропорциональности реакций жесткости опор, в статически неопределимых симметричных стержневых системах при изгибе, в сочетании «изгиб/растяжение», имеет погрешность в сравнении с точным. В связи с этим, необходимо дальнейшее изучение влияния жесткости опор в стержневых системах при изгибе.

Литература:

1. Ананьин М.Ю., Фомин Н.И. Метод учета податливости в узлах металлических конструкций зданий // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2010. №2. С.72 – 74.
2. Фабричная К.А., Абдрахимова Н.С., Альтапов С.Р. Особенности моделирования каркаса здания с учетом податливости узлов сопряжения при ветровых воздействиях // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). С.255 – 261.
3. Горунович С.Б. Об одном из способов раскрытия статической неопределимости в симметричных конструкциях // Труды Братского Государственного Университета. 2009. Т.2. С.84 – 89.
4. J. García de Jalón, M.D. Gutiérrez-López. Multibody dynamics with redundant constraints and singular mass matrix: existence, uniqueness, and determination of solutions for accelerations and constraint forces // Multibody System Dynamics. 2013. V.30. №3. P.311–341.

Constraint redundancy disclosure in symmetric rod structures taking into account constraint compliance

Gorunovich S.B.

Ust-Ilimsk thermal power plant, Public company “IRKUTSKENERGO”, Ust-Ilimsk, 666684, Russian Federation
Gorunovich@rambler.ru

Keywords: symmetric rod structure, constraint redundancy

In this study we present a summary of characteristics of existing methods of constraint redundancies disclosure in rod structures. The excessive complications of existing analytical calculations and the dependence of those results from taken analysis models we brought into view. We revealed that one of the factors, influencing the analysis model perfection, is whether constraint compliance was taken into account or not. So we show the alternative simplified method of disclosure constraint redundancies on the symmetric rod structure strength calculation example, taking into account the constraint compliance. We discovered the internal force value dependence of the distance from the point of application of load force in symmetric rod structures with constraint redundancies (including beams under longitudinal and transverse bending). The internal force value dependence of constraint compliance is also revealed. All dependences are confirmed by calculation examples. We underlined the relevance of the proposed simplified method presenting more complex structure examples. We made the conclusion about the possibility of using alternative way of constraint redundancy disclosure in the symmetric rod structures under tension and bending. However, further research on simplified methods of strength calculations, taking into account constraint compliance in symmetric beam structures is necessary.

УДК 621.791.12

Композиционный материал "алюминий-магний", сформированный сваркой взрывом

Матц О.Э.[a], Фелофьянова А.В.[b], Воробьев Р.С.[c]

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса 20, г. Новосибирск, Россия
[a]o.matts@mail.ru, [b]aniytka1993@mail.ru, [c]roman_vorobey@mail.ru

Ключевые слова: композит, сварка взрывом, алюминий, магний

В статье рассматриваются структура и свойства композиционных материалов системы «алюминий-магний», сформированных по технологии сварки взрывом из тонких пластин алюминия и магния. Структура полученных материалов исследовалась методами оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии. Элементный состав был определен энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализом, а также были проведены измерения микротвердости по методу Виккерса. Показано, что в сформированных взрывом материалах отсутствуют значительные дефекты в виде трещин. Установлено, что для биметаллов характерна волновая граница сварного соединения. Кроме того, в сварном шве наблюдалось формирование вихрей. Отличительной особенностью этих вихрей является значительно большее значение микротвердости, чем значения микротвердости исходных материалов. Распределение химических элементов в различных областях зоны сварного соединения «алюминий-магний» является практически равномерным.

Введение. В настоящее время магниевые и алюминиевые сплавы часто применяются в различных отраслях промышленности ввиду их относительно низкой плотности. Кроме того, для этих сплавов характерны такие свойства, как высокие теплопроводность и электрическая проводимость, высокая пластичность и хорошая коррозионная стойкость [1].

Существует различные методы соединения алюминия и магния. Однако технология сварки взрывом обсуждается крайне редко. Поэтому в данной работе рассматривается формирование биметалла "алюминий-магний" методом сварки взрывом. Технология позволяет получать прочные сварные соединения между разнородными материалами с относительно тонкой границей сварного шва. Следует отметить, что результаты исследований композитов, полученных по технологии сварки взрывом, обсуждались ранее во многих работах (например, [2-4]). Тем не менее, структура и свойства сваренных взрывом композиций «алюминий-магний» изучены не достаточно подробно.

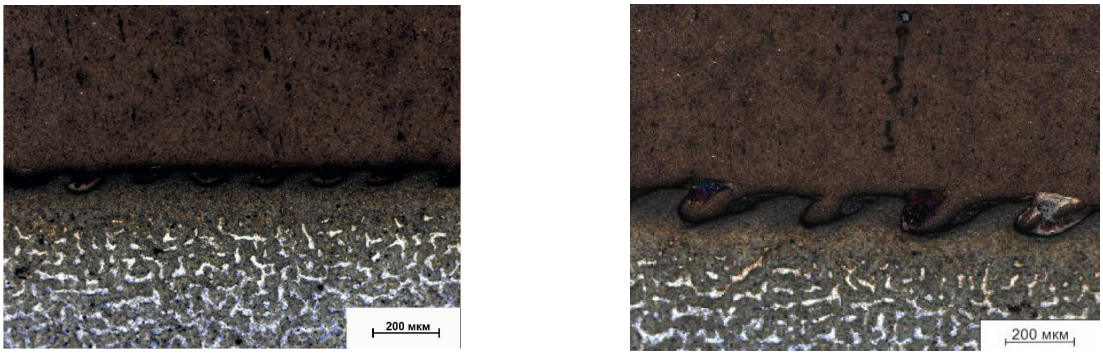
Цель данной работы заключается в исследовании возможности формирования композиционного материала типа "алюминий-магний" методом сварки взрывом.

Материалы и методы исследования. По технологии подводной сварки взрывом были сформированы биметаллы Al-Mg из технически чистых пластин алюминия и магния. Использовалась схема параллельного расположения свариваемых пластин.

Микроструктура композитов была исследована методом оптической микроскопии и растровой электронной микроскопии, также были проведены измерения микротвёрдости по Виккерсу. Измерения проводились по поперечному сечению образца в направлении от алюминия (метаемой пластины) к магнию (неподвижная пластина) перпендикулярно границе сварного соединения с нагрузкой на индентор 0,1 кг.

Методом энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа был определен элементный состав в зонах сварных соединений.

Результаты и обсуждение. Результаты металлографического анализа показали, что между алюминием и магнием образовалось соединения с волновой структурой. При больших увеличениях отчётливо наблюдается, что сформировалась бездефектная зона соединения. При этом размер волны увеличивается в направлении от точки инициирования взрыва (рис. 1 а) к противоположному краю образца (рис.1 б).



а) *б)*

Рис. 1. Зона соединения, сформированная сваркой взрывом между алюминием и магнием

На рис. 2 представлено изображение сварного соединения, полученное на растровом электронном микроскопе. Установлено, что для крупных зон перемешивания материалов на границе соединения характерен вихревой тип течения металлов.

По исследованию микротвёрдости показано, что для зоны сварного соединения характерно значение микротвёрдости 320 HV, что значительно выше по сравнению со значениями исходных материалов (50…100 HV, рис. 3).

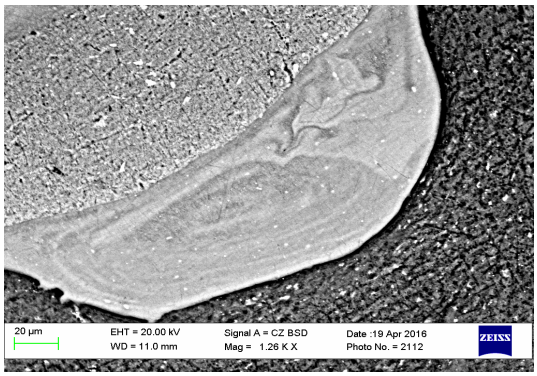


Рис. 2. Вихревое течение металла в зоне сварного соединения образца Al-Mg

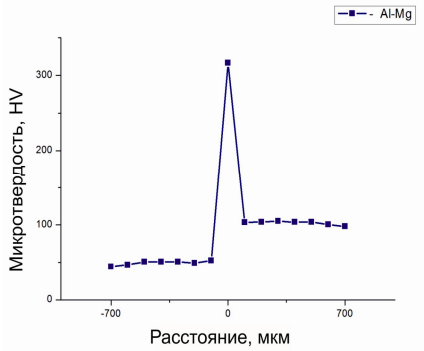


Рис. 3. Распределение микротвёрдости в образце Al-Mg

Результаты исследования элементного состава методом энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа показали, что соотношение алюминия к магнию в зоне сварного соединения составило примерно 3:2 соответственно (рис. 4, табл. 1).

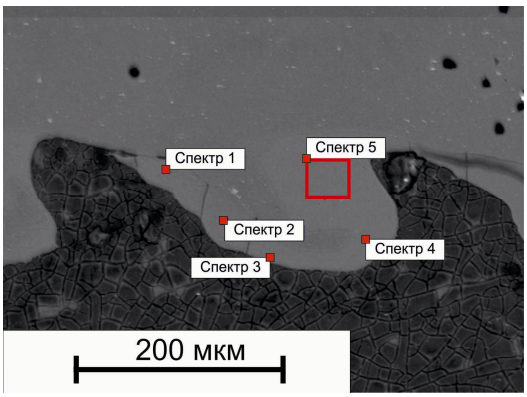


Рис. 4. Распределение химических элементов в зоне сварного соединения образца Al-Mg

Таблица 1

Результаты оценки элементного анализа в различных областях образца Al-Mg

№ спектра	Al, ат. %	Mg, ат. %
1	58,22	41,78
2	50,76	49,24
3	61,45	38,55
4	64,06	35,94
5	61,91	38,09

Выводы: Учитывая приведённые результаты исследований, можно заключить, что метод сварки взрывом позволяет формировать качественные соединения между алюминием и магнием. На межслойной границе наблюдается формирование волн и зон перемешивания, состоящих из алюминия и магния. Твёрдость соединений, наблюдаемых на межслойных границах, значительно выше твёрдости исходных материалов.

Литература:

1. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1981. - 416 с.
2. M. Benák, M. Turňa, P. Palček, P. Nesvadba. Study of Explosion Welding of Mg Alloy with Aluminium. Defect and Diffusion Forum, Vols. 297-301 (2010), pp. 1177-1182.
3. Structure and microhardness of Cu-Ta joints produced by explosive welding / Iu. N. Maliutina, V. I. Mali, I. A. Bataev, A. A. Bataev, M. A. Esikov, A. I. Smirnov, K. A. Skorokhod // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–7.
4. Mali, V. I. Microstructure and strength of explosively welded titanium / Ni based alloy composite with Cu / Ta as interlayer / V. I. Mali, Iu. N. Maliutina, K. A. Skorokhod // Applied Mechanics and Materials. – 2014. –Vol. 682. – P. 21–24.

"Aluminum-magnesium" composite material produced by explosion welding

Matts O.E.[a], Felofyanova A.V.[b], Vorobiev R.S.[c]

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
[a]o.matts@mail.ru, [b]aniytka1993@mail.ru, [c]roman_vorobey@mail.ru

Keywords: composite, explosion welding, aluminum, magnesium

In the paper the technology of explosion welding is discussed to produce a strong welded joint between aluminum and magnesium from commercially pure plates. The structures of the bimetals were investigated by optical microscopy and scanning electron microscopy. Energy dispersive X-ray microanalysis was used for the elemental analysis of the samples. Vickers hardness test was used to compare the level of the starting materials microhardness with the level of the welded joint. It is shown that the bimetals do not contain microcracks. There is the wave boundary of the welded joint. The microhardness of starting materials is much less than the microhardness of the welded joint. The distribution of chemical elements in different regions of the welded joint zone is almost uniform.

УДК 620.171

Изменение физико-механических свойств алюминиевого сплава 1560 после обработки интенсивной пластической деформацией

Красновейкин В.А. [2,a], Скрипняк В.А. [1,b], Москвичев Е.Н., Козулин А.А.[1], Бородулин Д.А.[1]

[1]Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, Россия
[2]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, Россия
[a]volodia74ms@yandex.ru, [b]skrp@ftf.tsu.ru

Ключевые слова: алюминиевый сплав, прочность, интенсивная пластическая деформация, микроструктура

В работе приведены результаты исследований влияния интенсивной пластической деформации (ИПД) на микроструктуру и физико-механические свойства крупнокристаллического алюминий-магниевого сплава 1560 в состоянии поставки со средним размером зерна 50 мкм. Обработка ИПД реализована по схеме четырехпроходного равноканального углового прессования (РКУП), в результате чего в исследуемом сплаве получена ультрамелкозернистая структура со средними размерами зерна 3 мкм. Анализ экспериментальных данных выявил значительный вклад ИПД в изменение физико-механических свойств. Установлено, что после обработки сплава 1560 его микротвердость возросла на 50 %, условный предел текучести при растяжении на 80 %, временное сопротивление на 44 % по сравнению с соответствующими значениями параметров в состоянии поставки. Определены константы аппроксимирующих соотношений для экспериментальных диаграмм растяжения образцов из исследуемого сплава в исходном и обработанном состояниях.

Введение. Легкие сплавы на основе алюминия играют ключевую роль в современной технике, поскольку они являются наиболее часто используемым цветным металлом. В частности, алюминий-магниевые сплавы обладают высокими удельными прочностными характеристиками, высокой коррозионной стойкостью, легкостью в обработке и поэтому широко применяются для создания элементов конструкций авиакосмической техники, скоростных судов, автомобилей. Возрастающие требования к прочности и надежности элементов конструкций новой техники являются стимулом для развития технологий обработки сплавов с целью повышения их прочностных свойств [1]. Технологии интенсивной пластической деформации позволяют за счет модификации зеренной структуры сплава варьировать величину предельной деформации до разрушения, предела текучести и временного сопротивления разрушению. Модификация крупнокристаллической (КК) зеренной структуры, в частности, ее измельчение с помощью интенсивной пластической деформации до нано и ультарамелкозернистого (УМЗ) состояния, открывает новые возможности для создания материалов с заданными свойствами [2]. Варьируя параметры режима и маршрута прессования, а так же подбирая программу дальнейшей обработки по схеме РКУП (температуру, скорость прессования, маршруты повторного прессования), можно добиться существенного повышения прочностных характеристик [3-5].

В данной работе исследованы изменения параметров зеренной структуры и физико-механических характеристик алюминий-магниевого сплава 1560 в результате интенсивной пластической деформации, реализованной при многократном ортогональном РКУП.

Материал и методы исследования. Призматические заготовки для обработки размерами 8x8x45 мм были изготовлены из горячекатаного прутка сплава 1560 (химический состав: 91 % Al – 7 % Mg – 0,73 Mn - < 1,2 % прочее). РКУП проводилось с использованием оригинальной стальной пресс-формы с каналами, пересекающимися под углом 90° без скруглений [5]. Такие геометрические особенности пресс-формы обеспечивают максимальную степень накопления пластической деформации в материале за один проход равной 115 %. Для прессования использовали универсальную сервогидравлическую испытательную машину Instron 40/50-20. Прессование проводилось при температуре 200 °C и скорости продавливания 15 мм/мин. Заготовки перед обработкой подвергали нагреву в каналах пресс-формы и выдерживали при постоянной температуре 15 минут. Для уменьшения трения между стенками каналов и заготовкой использовали высокотемпературную смазку на основе дисульфида молибдена (MoS_2).

После четырехкратного прессования из заготовок электроэрозионным методом были вырезаны образцы, использованные для испытаний на растяжение, определения микротвердости и исследований распределения размеров зерен в объеме.

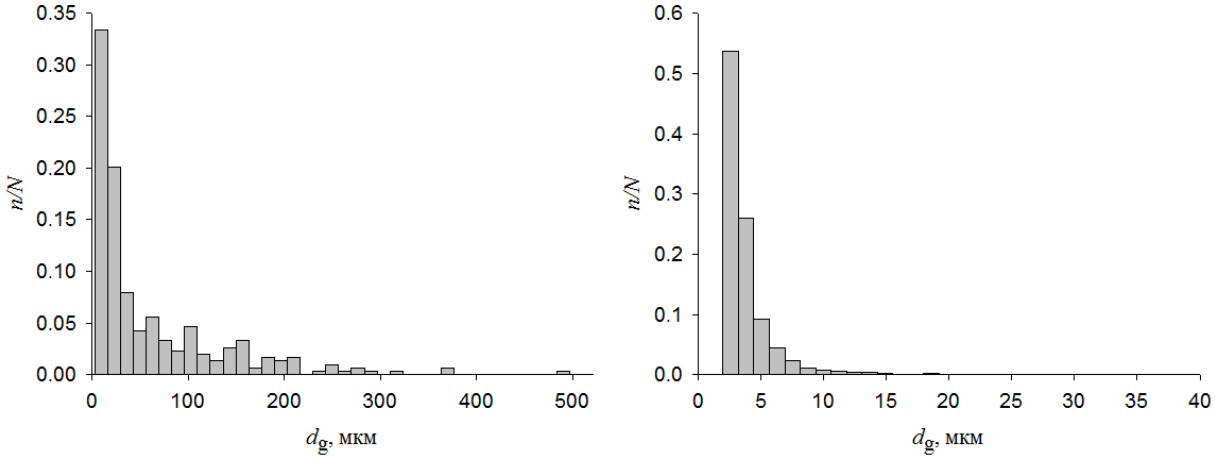
Исследования микроструктуры материала до и после обработки проводили методом анализа картин дифракции отраженных электронов (EBSD) с использованием электронного микроскопа TescanVega II LMU с приставкой дифракции отраженных электронов. Изучаемая поверхность образцов была подготовлена методом предварительной механической полировки и ионного травления на установке ION SLICER EM-09100. Анализ полученных данных проводился на лицензионном программном обеспечении HKL-Channel 5.

Эксперименты по измерению микротвердости образцов по Виккерсу HV проводили в соответствии со стандартом ISO 6507-1:2005 на боковой поверхности призматических заготовок в разных участках вдоль оси прессования. Использовали автоматический микротвердомер HMV G21ST SHIMADZU. Идентирование выполняли с нагрузкой 50 г и выдержкой 10 с. На каждом образце было больше 100 измерений. Подготовку поверхности проводили по стандартной методике с использованием механической шлифовки и полировки до зеркальной бездефектной поверхности. Для измерения скорости прохождения продольной упругой волны между противоположными торцами в призматических заготовках применялся ультразвуковой дефектоскоп HARFANG VEO 128:16 с датчиком частотой 5 МГц.

Испытания на одноосное растяжение были проведены со скоростью деформации 0,001 1/с при комнатной температуре с использованием электромеханической испытательной

машины Instron 3360. Плоские микрообразцы для испытаний в виде двухсторонних лопаток были вырезаны вдоль оси прессования заготовок. Размеры рабочей части образцов: длина 10±0,01 мм; ширина 3,2±0,01 мм; толщина 0,8±0,01 мм; радиус скругления 2,5 мм.

Результаты и обсуждение. В крупнокристаллическом состоянии сплав 1560 имеет структуру с распределением зерен по размерам от 2 до 400 мкм со средним размером 50 мкм.



а) *б)*

Рис. 1. Распределение размеров зерен в исследуемом сплаве
а – исходный материал; *б* – после обработки РКУП

На рис. 1 показаны гистограммы распределения зерен по размерам, где d_g – размер зерна в мкм, N и n – общее число измерений и количество зерен определенного размера, соответственно. После 4 проходов РКУП в объеме образца формируется УМЗ-структура со средним размером зерна 3 мкм.

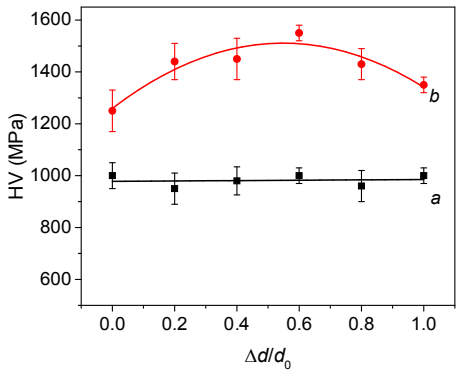
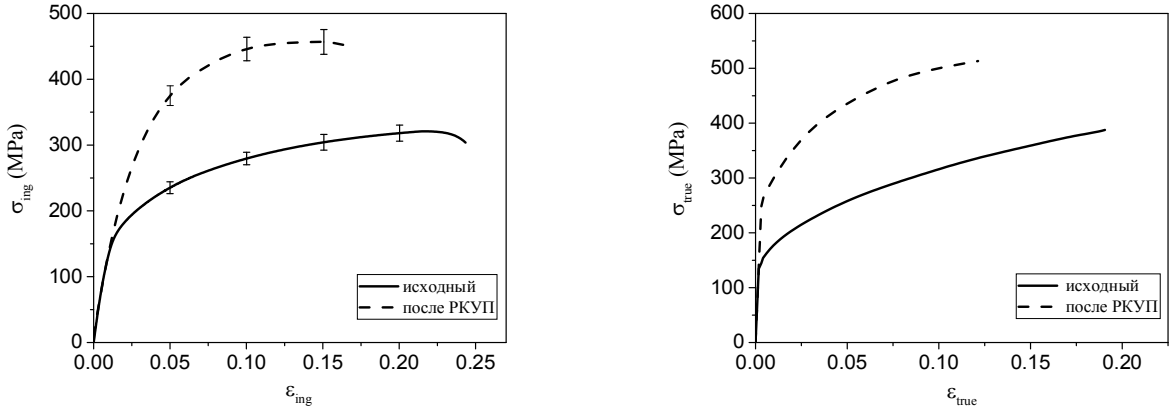


Рис. 2. Изменение величины микротвердости сплава 1560 вдоль оси заготовок
а – исходный материал; *б* – после обработки РКУП

Графики изменения микротвердости HV вдоль исследуемой поверхности заготовки показаны на рис. 2, где d – общая длина в мм, Δd – расстояние от края до области измерений в мм. При обработке экспериментальных результатов происходила выборка полученных данных и их осреднение, при этом были определены интервалы достоверности для всех статистических данных. Микротвердость сплава 1560 в состоянии поставки не превышала 1000 МПа, после четырехкратного прессования увеличивается в среднем на 50% , а её максимальная величина достигает 1550±30 МПа. В центральной части заготовок после четырехкратного прессования микротвердость на ~10 % выше по сравнению со средним значением. Это вызвано неоднородностью накопления пластической деформации в средней и крайних частях призматических заготовок при прессовании, что подтверждается результатами теоретических исследований [6].

На рис. 3а представлены экспериментальные зависимости напряжений от деформаций в условных координатах при одноосном растяжении двух партий плоских образцов из исходного сплава 1560 и после его обработки РКУП. В каждой партии испытано по 5 образцов. Значения интервалов достоверности удовлетворяют погрешности эксперимента до 5 %. После четырехпроходной обработки у исследуемого сплава отмечено увеличение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ на 80 %, временного сопротивления $\sigma_в$ на 44 % и уменьшение предельной деформации до разрушения ε_{max} в условиях растяжения на 30 %.



а) *б)*

Рис. 3. Зависимости напряжений от деформаций в образцах из сплава 1560 при одноосном растяжении *а* – в условных координатах; *б* – в истинных координатах

Эффекты увеличения микротвердости, условного предела текучести и временного сопротивления при растяжении с одновременным уменьшением предельных деформаций до разрушения после различных режимов и схем обработки ИПД являются характерной особенностью алюминий-магниевых сплавов [1,7 - 9].

Продольная скорость звука в сплаве в состоянии поставки и после обработки колеблется в пределах 0,04 % и составляет 5440±2 м/с, что соответствует модулю Юнга E равному 78±0,3 ГПа. Сводные данные по физико-механическим свойствам исследуемого сплава представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства сплава 1560 в исходном и обработанном состояниях

Образец	d_g (мкм)	HV (МПа)	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	$\sigma_в$ (МПа)	ε_{max}	E (ГПа)
Исходный	50	1000	150	320	0,24	78
РКУП	3	1550	270	460	0,17	78

При оценке возможных областей применения материала и способов его обработки в изделия методами резания, фрезерования, штамповки часто обращаются к помощи компьютерного моделирования. Для этого необходимо подбирать адекватные определяющие соотношения, способные описывать эффекты пластического течения и упрочнения. На практике при обработке экспериментальных данных и использовании их в расчетных модулях популярных инженерных приложений довольно часто используется условие проведения степенной аппроксимации, когда аппроксимирующая функция имеет две общие точки с экспериментальной кривой. Обычно эти точки соответствуют началу пластического течения (истинный предел текучести $S_{0,2}$) и моменту образования шейки (истинное напряжение $S_в$ при деформации $\varepsilon_р$). При этом необходимо представить экспериментальные зависимости напряжений от деформаций в истинных координатах, см. рис. 3б. Участок упругого деформирования на графике соответствует модулю упругости E, полученному при измерении скорости прохождения продольной упругой волны. В этом случае упруго-пластическое поведение сплавов можно аппроксимировать функцией Холомона [10]:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon,\ \varepsilon \le \varepsilon_y, \\ K\varepsilon^m,\ \varepsilon > \varepsilon_y; \end{cases}$$

где K – коэффициент упрочнения в МПа, m – показатель деформационного упрочнения, ε_y – деформация при истинном пределе текучести.

Коэффициенты аппроксимации определяются из экспериментальных данных по следующим формулам:

$$K = \frac{S_B}{(\varepsilon_p)^m}$$

$$m = \frac{\ln S_B - \ln S_{0,2}}{\ln \varepsilon_p - \ln \varepsilon_y},$$

$$\varepsilon_y = 0,002 + \frac{\sigma_{0,2}}{E}$$

Данные для проведения аппроксимации и результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Данные для аппроксимации пластического течения сплава 1560 при растяжении и результаты

Образец	$S_{0,2}$ (МПа)	$S_в$ (МПа)	$\varepsilon_р$	K (МПа)	m
Исходный	150	387	0,191	573	0,237
РКУП	270	513	0,121	792	0,206

Выводы. Найден режим многопроходного ортогонального равноканального углового прессования для алюминиевого сплава 1560, позволяющий создавать ультрамелкозернистую структуру со средним размером зерна 3 мкм в объемных заготовках без нарушения их целостности.

Оценено влияние ИПД на структуру и физико-механические свойства алюминиевого сплава. Показано, что обработка ИПД в схеме четырехкратного РКУП по траектории B_c позволяет повысить прочностные свойства алюминиевого сплава 1560, а именно микротвердость на 50 %, предел текучести на 80 %, временное сопротивление до разрушения на 44 % по сравнению с соответствующими величинами сплава в состоянии поставки. Установлено, что выбранный режим РКУП не влияет на изменение величины модуля Юнга.

Для применения результатов исследований при численных расчетах представлены данные экспериментов по одноосному растяжению в виде зависимостей напряжений от деформаций в истинных координатах. Выбрана степенная аппроксимация Холомона, которая позволяет достаточно точно описать механическое поведение сплавов в КК и УМЗ состояниях на участке деформирования до достижения временного сопротивления. Определены константы аппроксимирующих функций, из которых видно, что обработка ИПД также влияет на характер пластического течения. Коэффициент упрочнения после обработки сплава увеличился на 40 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5914.2016.1.

Литература:

1. Sabirov I., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. et al. Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: new horizons in development // Materials science and engineering: A. 2013. V. 560. P. 1-24.

2. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. - Академкнига, Москва. 2007. 397 с.

3. Estrin Y., Murashkin M.Yu., Valiev R.Z. Ultrafine-grained aluminium alloys: Processes, structural features and properties// Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications. 2010. pp. 468-503.

4. Маркушев М.В. К вопросу об эффективности некоторых методов интенсивной пластической деформации, предназначенных для получения объемных наноструктурных материалов//Письма о материалах. 2011. т.1. №1. С. 36-42.

5. Козулин А.А., Скрипняк В.А., Красновейкин В.А., Скрипняк В.В., Каравацкий А.К. Исследование физико-механических свойств ультрамелкозернистых магниевых сплавов после интенсивной пластической деформации // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 9. С. 98-104.

6. Vladimir K., Vladimir S., Alexander K., Olga S. Numerical simulation of severe plastic deformation of titanium specimens under dynamic channel pressing. Advanced Materials Research. 2014. no. 1040. pp. 107-112.

7. Markushev M.V., Murashkin M.Yu. Structure and mechanical properties of commercial Al–Mg 1560 alloy after equal-channel angular extrusion and annealing. Materials Science and Engineering A. 2004. no. 367. pp. 234-242.

8. Loucif A., Figueiredo R.B., Baudin T., Brisset F., Chemam R., Langdon T.G. Ultrafine grains and the Hall–Petch relationship in an Al–Mg–Si alloy processed by high-pressure torsion. Materials Science and Engineering A. 2012. no. 532. pp. 139-145.

9. Москвичев Е.Н., Скрипняк В.А., Лычагин Д.В., Козулин А.А., Скрипняк В.В. Влияние структуры на сопротивление пластической деформации алюминиевого сплава 1560 после обработки методом прессования рифлением. Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 2 (22). С. 141-145.

10. Огар П.М., Горохов Д.Б., Соболевский А.А., Чебыкин В.С. Определение параметров упрочнения материалов для задач упругопластического внедрения сферы // Механики XXI веку. 2016. 15. С. 213-219.

Changes in physical and mechanical properties of the Al-based alloy 1560 caused by severe plastic deformation

Krasnoveikin V.A. [2,a], Skripnyak V.A. [1,b], Moskvichev E.N., Kozulin A.A.[1], Borodulin D.A.[1]

[1]Tomsk State University, 36, pr. Lenina, Tomsk, Russia
[2]Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, Russia
[a]volodia74ms@yandex.ru, [b]skrp@ftf.tsu.ru

Keywords: Aluminum alloy; grain structure; mechanical properties; severe plastic deformation

The influence of severe plastic deformation (SPD) on the physical and mechanical properties of Al-based alloy 1560 are investigated. SPD-method was realized according to the scheme of equal-channel angular pressing (ECAP). The grain size distribution in coarse grain alloy varied in the range from 4 to 400 μm, and the average grain size was equal to about 50 μm. After four ECAP passes, a more uniform ultrafine-grained structure was obtained within the bulk with the average grain size about 3 μm. The average microhardness of the alloy was increased after treatment by 50 % in the entire volume of the specimens. According to tensile test data, the yield strength and ultimate tensile strength were increased four ECAP passes by 80 and 44 %, respectively. All experimental data prove that SPD in optimal treatment conditions enhances the strength characteristics of structural alloy 1560. The constants of approximating relationships for the experimental tensile diagrams of the specimens from investigated alloy in as-received and processed states were determined.

УДК 539.4.(076.5)

Конечно-элементная расчётная модель промышленных зданий как система тонкостенных стержней открытого профиля

Мацеля В.И.[1,a], Сеелев И.Н.[1,a], Леконцев А.В.[1,a], Хафизов Р.Р.[2,b], Панасенко Н.Н.[3,c], Синельщиков А.В.[4,d], Яковлев П.В.[3,c]

[1]ИХЗ ФГУП «ГХК», 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 53
[2]ООО «Геолком», 662974, г. Железногорск Красноярского края, п. Додоново, ул. Луговая, 10
[3]ООО «Подъёмные сооружения», 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16ж, к. 36
[4]ГАОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный университет», 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18
[a]atomlink@mcc.krasnoyarsk.su, [b]geolkom@yandex.ru, [c]psastr@mail.ru, [d]sinelschikov@aucu.ru

Ключевые слова: уравнение движения, матрица жёсткости, матрица масс, тонкостенный стержень открытого профиля, метод конечных элементов, конечный элемент, расчётная модель, промышленное здание

Изложена общая методическая основа расчётного анализа методом конечных элементов пространственных конструкций промышленных зданий как систем из тонкостенных стержней открытого профиля, предложены теоретические основы построения матриц масс и жёсткостей тонкостенных стержней, необходимые для построения расчётно-динамических моделей промышленных зданий, подвергающихся расчётному анализу на динамические и сейсмические воздействия. Предложенная методическая основа соответствует требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии НП-031-01, МР.1.5.2.05.999.0025-2011 и рекомендаций МАГАТЭ. Разработанные методы использованы для комплексной оценки сейсмической безопасности промышленного здания и встроенного в него технологического и грузоподъемного оборудования ХОТ-1 (мостовых кранов, трубопроводов, ёмкостного и насосного оборудования) горно-химического комбината (г. Железногорск, Красноярского края) для условий максимального расчётного землетрясения 7,6 баллов по шкале MSK-64.

Для проведения динамического расчётного анализа пространственных конструкций, составленных из стержней открытого профиля, как это следует из теории совместимых КЭ в рамках алгоритма МКЭ на необходимое для расчётов расчётное сочетание нагрузок следует, с учётом работы [1], сформировать математическую конечно-элементную модель сооружения с *n* степенями свободы

$$[M]\{\ddot{V}(t)\}+\left[\gamma_з\left([M][K]\right)^{0,5}\right]\{\dot{V}(t)\}+[K]\{V(t)\}=\{P_{ст}\}+\{P_{дин}\}-[M]\{\ddot{A}(t)\}, \quad (1)$$

в котором $\gamma_з$ – коэффициент потерь [2, 3]:

$$\gamma_з=2\xi=2\left(\delta_з\left[(2\pi)^2+\delta_з^2\right]^{-0,5}\right)\approx\delta_з(\pi)^{-1}, \quad (2)$$

при этом $\delta_з$ – логарифмический декремент затухания колебаний, в соответствии с которым коэффициент относительного демпфирования в (2) для стальных конструкций лежит в диапазоне $\xi\le 0,02\div 0,04$ ($\delta_з=0,125\div 0,25$), для железобетонных конструкций - $\xi\le 0,04\div 0,06$ ($\delta_з=0,25\div 0,38$) и более.

Очевидно, вектора в правой части уравнения движения (1) обозначают внешние статические, динамические и кинематические воздействия, в которых $\{\ddot{A}(t)\}$ может обозначать акселерограммы землетрясений [4], а выражение перед вектором скорости $\{\dot{V}\}$ - матрица затухания Мартемьянова-Цейтлина [2].

В уравнении движения (1) следует также учесть, что матрицы жёсткости типа $\left[K\right]^{jk}$ и масс $\left[M\right]^{jk}$ отдельного КЭ *jk* получены в местной системе координат (МСК) O*xyz*, являются симметричными и имеют блочную структуру:

$$\left[K\right]^{jk}_{\substack{14\times14\\MCK}} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & \dots. & k_{114} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & \dots & k_{214} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & \dots & k_{314} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{j1} & \dots & \dots & \dots & k_{jk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{141} & k_{142} & k_{143} & \dots & \dots & k_{1414} \end{bmatrix}_{14\times14} = \begin{bmatrix} \left[K\right]^{jj}_{7\times7} & \left[K\right]^{jk}_{7\times7} \\ \left[K\right]^{kj}_{7\times7} & \left[K\right]^{kk}_{7\times7} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

в которых *j* и *k* обозначают узлы начала и конца КЭ соответственно.

Для получения матриц $\left[M\right]$ и $\left[K\right]$ полной системы порядка *n*×*n* в общей системе координат (ОСК) O*XYZ* матрицу КЭ (3) необходимо перевести из МСК O*xyz* КЭ *jk* в общую O*XYZ* с использованием матрицы (5) преобразования координат $[T]^{jk}_{14\times14}$ [5]:

$$\left[K\right]^{jk}_{14\times14} = \left[T^{T}\right]^{ok}\left[K\right]^{jk}_{\substack{14\times14\\MCK}}\left[T\right]^{jk}, \quad (4)$$

в которой

$$[T]^{jk}_{14\times14} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} [\Lambda]_{3\times3} & [0]_{3\times3} & 0 \\ [0]_{3\times3} & [\Lambda]_{3\times3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_{7\times7} & [0]_{7\times7} \\ [0]_{7\times7} & \begin{pmatrix} [\Lambda]_{3\times3} & [0]_{3\times3} & 0 \\ [0]_{3\times3} & [\Lambda]_{3\times3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}_{7\times7} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Как известно, $[\Lambda]_{3\times3}$ в матрице (5) – линейное преобразование базиса ОСК в базис МСК определяется углами Эйлера.

После преобразований (4) матрица жесткости (масс) полной системы формируется методом суперпозиции:

$$\left[K\right]_{n\times n} = \sum_{jk=1}^{jk=s}\left(\left[K^{jk}\right]^{0XYZ}_{14\times14}\right)_{n\times n} = \begin{bmatrix} k_{1,1} & \dots & k_{1,k} & \dots & k_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{j,1} & \dots & k_{j,k} & \dots & k_{j,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n,1} & \dots & k_{n,k} & \dots & k_{n,n} \end{bmatrix}_{n\times n}, \quad (6)$$

где *s* – число КЭ в расчётной модели полной системы.

Также укажем, что от матричного линейного уравнения (1) без труда можно перейти к нелинейному расчётному анализу, для чего в левую часть (1) необходимо ввести вектор $\left\{R\left(V,\dot{V}\right)\right\}$, характеризующий силы трения, включающиеся и односторонние связи, в частности, стальные канаты, демпферы, модели физически нелинейных материалов и др. Нагрузки природного характера в правой части уравнения (1) принимаются согласно положений СП 20.13330.2011 [6] с учётом положений НП-064-2005 [7], а также требованиями ТЗ на конструкционные системы, подлежащие расчётному анализу. Расчётные сейсмические воздействия принимаются согласно параметров детального сейсмического районирования, руководствуясь НТД [4, 8].

Напряжённое состояние КЭ вычисляется по параметрам перемещений $\left\{V\left(t\right)\right\}_{1\times n}$ после перехода к напряжениям по внутренним усилиям, возникающим в концевых сечениях КЭ от действия внутренних сил, действующих на КЭ. Нормальное напряжение в произвольной

точке концевого сечения $j(k)$ тонкостенного КЭ jk с учётом депланации $B^{j(k)}$ определяется по формуле [5]:

$$\sigma^{j(k)} = \frac{N_z^{j(k)}}{A} - \frac{M_x^{j(k)}}{I_x} y + \frac{M_y^{j(k)}}{I_y} x + \frac{B^{j(k)}}{I_\omega} \omega_c , \qquad (7)$$

где x, y – линейные координаты заданной точки сечения; ω_c и I_ω – секториальная координата и секториальный момент инерции сечения. Касательные напряжения в произвольной точке концевого сечения $j(k)$ тонкостенного КЭ jk открытого профиля определяется по формуле [5]:

$$\tau^{j(k)} = \frac{Q_x^{j(k)} S_y^{j(k)}}{2 I_y t_\text{п}} + \frac{Q_y^{j(k)} S_x^{j(k)}}{I_x t_\text{с}} + \frac{M_\omega S_\omega^{j(k)}}{I_\omega t_c} + \frac{M_0^{j(k)}}{I_d t_c} ; \qquad (8)$$

закрытого профиля коробчатого (замкнутого) сечения:

$$\tau^{j(k)} = \frac{Q_x^{j(k)} S_y^{j(k)}}{2 I_y t_n} + \frac{Q_y^{j(k)} S_x^{j(k)}}{2 I_x t_\text{с}} + \frac{M_\omega S_\omega^{j(k)}}{I_\omega t_c} + \frac{M_z^{j(k)}}{A_\Omega t_c} , \qquad (9)$$

где $M_z = M_0 + M_\omega$ – суммарный крутящий момент; $M_o = G I_d \theta'$ - крутящий момент; M_ω – изгибно-крутящий момент; θ' – производная от угла закручивания, A_Ω – удвоенная площадь контура коробчатого (замкнутого) сечения; $S_{x(y,\omega)}$ – статические и секториально-статический моменты отсечённой площади в рассматриваемом сечении; $t_{c(n)}$, $I_{c(n)}$ – толщина стенки (полки) и её осевой момент инерции.

Эквивалентные напряжения в любой точке сечений с учётом (7) – (9) определяются по третьей теории прочности:

$$\sigma_э^{j(k)} = \sqrt{\left(\sigma^{j(k)}\right) + 4(\tau^{j(k)})^2} \le R . \qquad (10)$$

Исходя из предпосылок, представленных в [9-11], рассмотрим наиболее характерные стороны теории тонкостенных стержней открытого профиля (рис. 1).

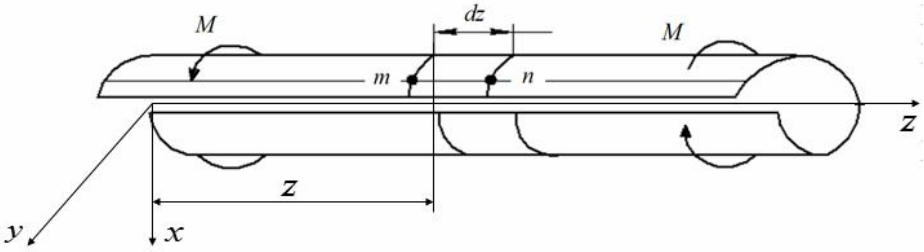


Рис. 1. Равновесие выделенного элемента тонкостенного стержня открытого профиля

Особенностью и новизной полученных решений является учёт влияния сдвигов срединной поверхности тонкостенных стержней открытого профиля на их напряжённо-деформированное состояние [5].

Значения элементов искомой матрицы жёсткости (3) при прочностном расчёте зависит от жёсткостных параметров КЭ и принятого закона изменения компонентов межузловых перемещений, в качестве которых примем аппроксимирующие функции Эрмита [9]:

$$\begin{aligned} \xi(z) &= \sum q_s \psi_s(z), \quad s = 1,5,8,12, \\ \eta(z) &= \sum q_s \psi_s(z), \quad s = 2,4,9,11, \\ \zeta(z) &= \sum q_s \psi_s(z), \quad s = 3,10, \\ \Theta(z) &= \sum q_s \psi_s(z), \quad s = 6,7,13,14, \end{aligned} \qquad (11)$$

в которых q_s – узловое перемещение: s = 1, 2, …, 14, как степени свободы (n = 14) узла; $\psi_s(z)$ – аппроксимирующие функции Эрмита тонкостенных стержней открытого и замкнутого профилей с двумя осями симметрии жёстко защемлённого по концам с учётом сдвига срединной поверхности, имеющие вид [12]:

$$\psi_{2,x}(z)=\psi_{1,y}(z)=\psi_{6,\omega}(z)=1-2\frac{K_{ii}}{K_i l}\cdot\frac{EJ_i}{GA}\cdot z-\frac{1}{4K_i}\cdot z^2+\frac{1}{6K_i l}\cdot z^3;$$
$$\psi_{4,x}(z)=\psi_{5,y}(z)=-\psi_{7,\omega}(z)=\left(1-\frac{K_{ii}}{K_i}\cdot\frac{EJ_i}{2GA}\right)\cdot z-\left(1+\frac{l^2}{4K_i}\right)\cdot\frac{z^3}{2l}+\frac{1}{12K_i}\cdot z^3;$$
$$\psi_{9,x}(z)=\psi_{8,y}(z)=\psi_{13,\omega}(z)=\frac{K_{ii}}{GA}\cdot\frac{EJ_i}{K_i l}\cdot z+\frac{1}{4K_i}\cdot z^2-\frac{1}{6K_i l}\cdot z^3;$$
$$\psi_{11,x}(z)=\psi_{12,y}(z)=\psi_{14,\omega}(z)=\frac{K_{ii}}{GA}\cdot\frac{EJ_i}{2K_i}\cdot z+\left(\frac{l}{8K_i}-\frac{1}{2l}\right)\cdot z^2-\frac{1}{12K_i}\cdot z^3;$$
$$\psi_{3,z}(z)=1-z/l;\qquad \psi_{10,z}(z)=z/l,\tag{12}$$

в которых

$$K_i=\frac{l^2}{12}+K_{ii}\frac{EJ_i}{GA},(i=x,y,\omega)\,.\tag{13}$$

Следуя (11) и (12), учтём влияние деформации сдвига, включив в выражение для потенциальной энергии деформации тонкостенного стержня открытого профиля V ту её часть, которая вызвана работой касательных напряжений (8) [9 - 11]:

$$V=\frac{1}{2}\int_0^l\left\{EA(\zeta')^2+EI_y(\xi'')^2+EI_x(\eta'')^2+EI_\omega(\Theta'')^2+GI_d(\Theta')^2\right\}dz+$$
$$+\frac{1}{2GA}\int_0^l\left\{K_{yy}(EI_y\xi''')^2+K_{xx}(EI_x\eta''')^2+K_{\omega\omega}(EI_\omega\Theta''')^2+\right.$$
$$\left.+2K_{xy}EI_xEI_y\eta'''\xi'''+2K_{y\omega}EI_yEI_\omega\xi'''\Theta'''+2K_{x\omega}EI_xEI_\omega\eta'''\Theta'''\right\}dz,\tag{14}$$

в которой ξ, η, ζ – перемещения точек линии центров изгиба стержня в направлении осей МСК x, y и z (рис. 2), а также известные зависимости:

$$EA\varsigma'=N;\qquad EI_x\eta''=-M_x;$$
$$EI_y\xi''=M_y;\qquad -EI_x\eta'''=Q_y;$$
$$EI_y\xi'''=Q_x;\qquad -EI_\omega\Theta'''=M_\omega.$$
$$-EI_\omega\Theta''=B_\omega;\tag{15}$$

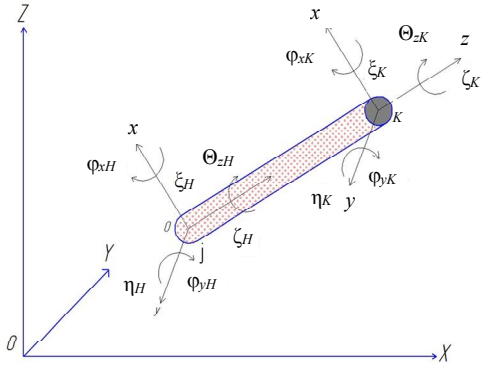


Рис. 1. Правило знаков для узловых перемещений (степеней свободы) тонкостенных стержней в местной системе координат (МСК)

Кроме (15), в (14) коэффициенты K_{ij} определяются по формуле:

$$K_{ij}=\frac{A}{I_iI_j}\int_A\frac{S_{i(s)}S_{j(s)}}{\delta^2}dA;\ \ i,j=x,\ y,\ \omega\,.\tag{16}$$

Для симметричных профилей, если сечение тонкостенного стержня симметрично относительно оси x, в (11) $K_{xy}=K_{y\omega}=0$. Если осью симметрии является ось y, то $K_{xy}=K_{x\omega}=0$. Если же сечение симметрично относительно обеих главных осей, то $K_{xy}=K_{x\omega}=K_{y\omega}=0$.

После чего любой ненулевой элемент матрицы жёсткости тонкостенного стрежня открытого профиля (3) в МСК при пространственном деформировании с учётом сдвига срединной поверхности определяется по формуле:

$$K_{jk}=\frac{\partial^2V}{\partial q_j\partial q_k},\quad j,k=1,\,2,\,...,\,14,\tag{17}$$

в которой V – потенциальная энергия деформации (14), а $q_{j(k)}$ – обобщённые перемещения (степени свободы) узлов КЭ jk:

$$k_{1,1}=k_{8,8}=-k_{1,8}=\frac{4EI_y}{l^3}A_y;\ \ k_{5,5}=k_{12,12}=\frac{EI_y}{l}\left(1+A_y\right);\ \ k_{5,12}=\frac{EI_y}{l}\left(A_y-1\right);$$

$$k_{1,5}=k_{1,12}=-k_{5,8}=-k_{8,12}=\frac{2EI_y}{l^2}A_y;\ \ k_{3,3}=k_{10,10}=-k_{3,10}=\frac{EA}{l};$$

$$k_{2,2}=k_{9,9}=-k_{2,9}=\frac{4EI_x}{l^3}A_x;\ \ k_{4,4}=k_{11,11}=\frac{EI_x}{l}\left(1+A_x\right);\ \ k_{4,11}=\frac{EI_x}{l^2}\left(A_x-1\right);$$

$$k_{4,9}=k_{9,11}=-k_{2,4}=-k_{2,11}=\frac{2EI_x}{l^2}A_x;\ \ k_{6,6}=k_{13,13}=-k_{6,13}=\frac{4EI_\omega}{l^3}A_\omega+\frac{6GI_k}{5l};$$

$$k_{7,14}=\frac{EI_\omega}{l}\left(A_y-1\right)-\frac{lGI_k}{30};\ \ k_{7,7}=k_{14,14}=\frac{EI_\omega}{l}\left(1+A_y\right)+\frac{2lGI_k}{5};$$

$$k_{7,13}=k_{13,14}=-k_{6,7}=-k_{6,14}=\frac{2EI_\omega}{l^2}A_\omega+\frac{GI_k}{10};\ \ k_{1,2}=\frac{K_{xy}E^2I_xI_y}{GA\cdot K_x\cdot K_y\cdot l};\tag{18}$$

$$k_{1,6}=\frac{K_{y\omega}E^2I_yI_\omega}{GA\cdot K_y\cdot K_\omega\cdot l};\ \ k_{2,6}=\frac{K_{x\omega}E^2I_xI_\omega}{GA\cdot K_x\cdot K_\omega\cdot l};\ \ k_{8,9}=k_{1,2}=-k_{1,9}=-k_{2,8};$$

$$k_{8,13}=k_{1,6}=-k_{1,13}=-k_{8,6};\ \ k_{1,4}=k_{1,11}=k_{9,12}=-k_{2,12}=-k_{2,5}=-k_{4,8}=k_{5,9}=k_{8,11}=-k_{1,2}\frac{l}{2};$$

$$k_{1,7}=k_{1,14}=k_{12,13}=-k_{6,12}=-k_{5,6}=k_{5,13}=-k_{8,14}=-k_{7,8}=-k_{1,6}\frac{l}{2};$$

$$k_{4,5}=k_{5,11}=k_{4,12}=k_{11,12}=-k_{1,2}\frac{l^2}{4};\ \ k_{5,7}=k_{5,14}=k_{7,12}=k_{12,14}=-k_{1,6}\frac{l^2}{4};$$

$$k_{2,7}=k_{2,14}=-k_{9,14}=k_{6,11}=k_{4,6}=-k_{7,9}=-k_{4,13}=-k_{2,6}\frac{l}{2};$$

$$k_{9,13}=k_{2,6}=-k_{2,13}=-k_{9,6};\ \ k_{4,7}=k_{4,14}=k_{11,14}=k_{7,11}=k_{2,6}\frac{l^2}{4},$$

где, согласно [5],

$$A_i=\frac{3}{1+12K_{ii}\dfrac{EI_i}{l^2GA}},\qquad \left(i=x,\ y,\ \omega\right).\tag{19}$$

Теперь укажем, что при расчёте пространственных конструкций, составленных из тонкостенных стержней, на динамическое воздействие по МКЭ необходимо знать не только матрицу жёсткости (4), но и матрицу масс каждого стержня [11].

Аналогично (17), инерционные коэффициенты матрицы масс КЭ *jk* вычисляются по формуле:

$$m_{jk}=\frac{\partial^2T}{\partial\dot q_j\partial\dot q_k},\quad j,k=1,\ 2,\ ...,\ 14,\tag{20}$$

в которой T – кинетическая энергия деформации КЭ *jk*

$$\begin{aligned}T=\frac{1}{2}\rho\int_0^l\Bigg\{&A\left[\left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)^2+\left(\frac{\partial\eta}{\partial t}\right)^2+\left(\frac{\partial\zeta}{\partial t}\right)^2+r^2\left(\frac{\partial\Theta}{\partial t}\right)^2\right]+\\&+2A\left[\frac{\partial\xi}{\partial t}a_y-\frac{\partial\eta}{\partial t}a_x\right]\frac{\partial\Theta}{\partial t}+I_y\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\xi-\varphi_y\right)'\right]^2+I_x\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\eta-\varphi_x\right)'\right]^2+\\&+I_\omega\left[\frac{\partial}{\partial t}\left[\left(1+K_{\omega\omega}\right)\Theta-\varphi_\omega\right]'\right]^2\Bigg\}dz,\end{aligned}\tag{21}$$

в которой

$$r^2=a_x^2+a_y^2+\frac{I_x+I_y}{A}.\tag{22}$$

В формулах (21) и (22) ξ, ζ, η – компоненты перемещения центра изгиба (11) стержня с координатами [11] (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}a_x&=b_x+\frac{1}{I_x}\int_A\omega_b y dA-K_{x\omega},\\a_y&=b_y+\frac{1}{I_y}\int_A\omega_b x dA-K_{y\omega},\end{aligned}\tag{23}$$

зависящими от геометрических характеристик поперечного сечения стержня

$$K_{ij} = \frac{I_d}{I_i I_j}\int_A \frac{S_i S_j}{\delta^2} dA,\ i,j = x,y,\omega\,. \tag{24}$$

Приведем элементы матрицы масс $m_{jk} = m_{kj}$, по структуре аналогичной (3), учитывающие сдвиг срединной поверхности:

$$m_{2,2} = m_{9,9} = \rho\left\{\frac{13A\cdot l}{35} + \frac{6J_x}{5l} + \frac{4J_x}{l}\left(K_x + K_x^2\right) + \frac{4J_x}{l}K_x^2\cdot K_{xy}^2\right\},$$

$$m_{4,4} = m_{11,11} = \rho\left\{\frac{A\cdot l^3}{105} + \frac{2J_x\cdot l}{15} + J_x\cdot K_x^2\cdot l + J_x\cdot l\cdot K_x^2\cdot K_{xy}^2\right\},$$

$$m_{2,11} = m_{4,9} = -\rho\left\{\frac{13A\cdot l^2}{420} + \frac{J_x}{10} + J_x\left(K_x + 2K_x^2\right) + 2J_y\cdot K_x^2\cdot K_{xy}^2\right\},$$

$$m_{2,4} = -\rho\left\{\frac{11A\cdot l^2}{210} + \frac{J_x}{10} + J_x\left(K_x + 2K_x^2\right) + 2J_y\cdot K_x^2\cdot K_{xy}^2\right\},$$

$$m_{4,11} = -\rho\left\{\frac{A\cdot l^3}{140} + \frac{J_x l}{30} - J_x\cdot l\cdot K_x^2 - J_y\cdot l\cdot K_x^2\cdot K_{xy}^2\right\},$$

$$m_{2,9} = -\rho\left\{\frac{9A\cdot l}{70} + \frac{6J_x}{5l} - \frac{4J_x\cdot K_x^2}{l} - \frac{4J_x\cdot K_x^2\cdot K_{xy}^2}{l}\right\},$$

$$m_{6,6} = \rho\left\{\frac{13A\cdot r^2\cdot l}{35} + \frac{6J_\omega}{5l} + \frac{4J_\omega}{l}\left(K_\omega + K_\omega^2\right)\right\},$$

$$m_{7,7} = m_{14,14} = \rho\left\{\frac{A\cdot r^2\cdot l}{105} + \frac{2J_\omega l}{15} + J_\omega\cdot K_\omega^2\cdot l\right\},$$

$$m_{6,14} = m_{7,13} = \rho\left\{\frac{13A\cdot r^2\cdot l^2}{420} + \frac{J_\omega}{10} + J_\omega\left(K_\omega + 2K_\omega^2\right)\right\}, \tag{25}$$

$$m_{7,14} = \rho\left\{\frac{A\cdot r^2\cdot l^3}{140} + \frac{J_\omega l}{30} - J_\omega\cdot K_\omega^2\cdot l\right\},$$

$$m_{6,13} = -\rho\left\{\frac{9A\cdot r^2\cdot l}{70} + \frac{6J_\omega}{5l} + \frac{4J_\omega K_\omega^2}{l} + 2J_\omega K_\omega\right\},$$

$$m_{6,7} = -\rho\left\{\frac{11A\cdot r^2\cdot l}{210} + \frac{J_\omega}{10} + J_\omega\left(K_\omega + 2K_\omega^2\right)\right\},$$

$$m_{1,6} = \rho\frac{13A\cdot a_y}{35}l, \qquad m_{2,6} = -\rho\frac{13a_x}{35}l,$$

$$m_{4,7} = -\rho\frac{A\cdot a_x\cdot l^3}{105}, \qquad m_{5,7} = -\rho\frac{A\cdot a_y\cdot l^3}{105},$$

$$m_{6,9} = \rho\frac{9A\cdot a_x\cdot l}{70}, \qquad m_{6,8} = -\rho\frac{9A\cdot a_y\cdot l}{70},$$

$$m_{7,11} = -\rho\frac{A\cdot a_x\cdot l^3}{140}, \qquad m_{7,12} = -\rho\frac{A\cdot a_y\cdot l^3}{70},$$

$$m_{2,14} = \rho\frac{13A\cdot a_x\cdot l^2}{420}, \qquad m_{1,14} = -\rho\frac{13A\cdot a_y\cdot l^2}{420},$$

$$m_{1,7} = -\rho\frac{11A\cdot a_x\cdot l^2}{210}, \qquad m_{2,7} = \rho\frac{11A\cdot a_y\cdot l^2}{210},$$

$$m_{1,2} = \rho\left\{\frac{12E\cdot J_x\cdot J_y\cdot K_{xy}}{G\cdot J_d\cdot l^3}\left[\frac{12E}{G\cdot J_d\cdot l^2} - \left(J_x\cdot K_{xx} + J_y\cdot K_{yy}\right) - 2\right]\right\},$$

$$m_{1,11} = \rho\left\{\frac{6E\cdot J_x\cdot J_y}{\left(G\cdot J_d\right)^2\cdot l^2}K_{xy}\left[1 - \frac{12E\cdot J_y}{l^2\cdot G\cdot J_d}K_{yy} - \frac{12E\cdot J_x}{l^2\cdot G\cdot J_d}K_{xx}\right]\right\},$$

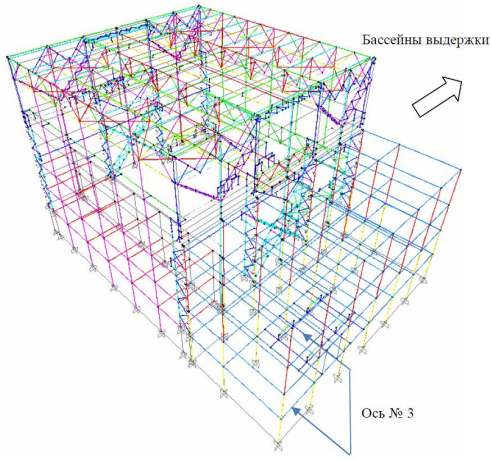
$$m_{1,4} = \rho\left\{\frac{6E\cdot J_x\cdot J_y\cdot K_{xy}}{G\cdot J_d\cdot l^2} - \frac{72E^2\cdot J_x\cdot J_y}{\left(G\cdot J_d\right)^2\cdot l^4}K_{xy}\left(J_x\cdot K_{xx} + J_y\cdot K_{yy}\right)\right\},$$

в которых с учётом (24),

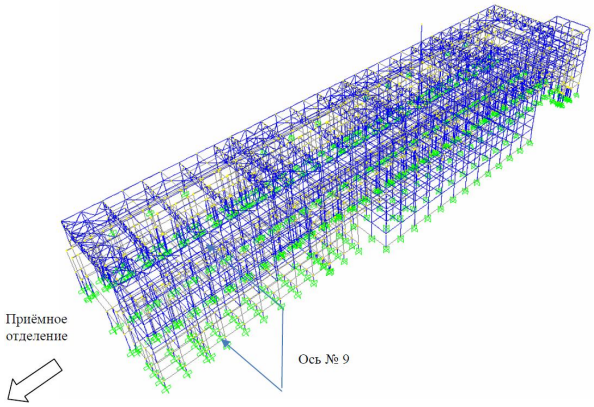
$$K_x = -\frac{6EJ_x}{GJ_d}\frac{K_{xx}}{l^2},\ \ K_\omega = -\frac{6EJ_\omega}{GJ_d}\frac{K_{\omega\omega}}{l^2}\,. \tag{26}$$

Изложенные в настоящем докладе методы и подходы, а также получившие развитие отдельные положения теории тонкостенных стержней [2, 4, 6, 7, 13, 14] предназначены для комплексной оценки сейсмической безопасности промышленного здания и встроенного в него технологического оборудования ХОТ-1 (рис. 3) (мостовых кранов, трубопроводов, ёмкостного и насосного оборудования) горно-химического комбината (ГХК) (г. Железногорск Красноярского края) (рис. 4).

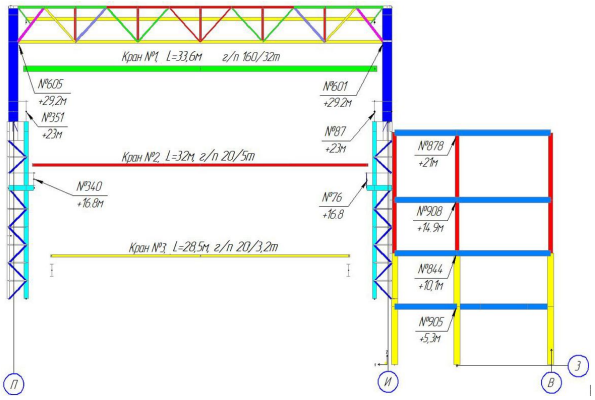
Рис. 3. Здание ХОТ-1 ГХК г. Железногорска (по материалам http://www.atomic-energy.ru/smi/2013)



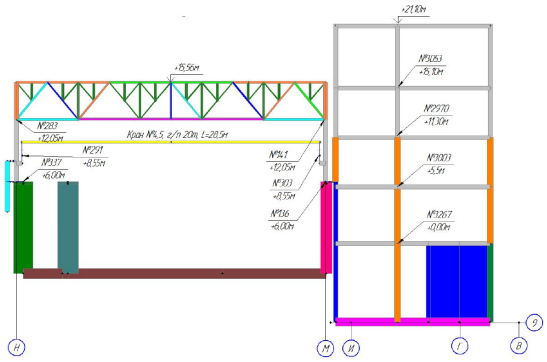
а) РДМ производственного корпуса приёмного отделения



б) РДМ бассейнов выдержки



в) сечение по строительной оси № 3, где на отм. +8,55 м, +16,8 м и +23,0 м расположены мостовые краны г/п 20/3,2 т, 20/5 т и 160/32 т



г) сечение бассейнов выдержки по строительной оси 3 9, на отм. +8,55 м расположен мостовой кран L = 28,5 м, г/п 20 т

Рис. 4. Расчётно-динамическая конечно-элементная модель (РДМ) приёмного отделения и бассейнов выдержки здания №1 ХОТ-1 ГХК

Из рис. 4 видно, что РДМ здания ХОТ-1 представляет собой дискретно-континуальную стержневую систему с числом степеней свободы n=46207 (узлов U=6601) и КЭ S=10660 (рис. 4). При разбиении здания ХОТ-1 на КЭ в качестве узлов были приняты: 1) точки пересечения осей стержней; 2) точки излома осей стержней; 3) точки примыкания

опорных связей; 4) крайние свободные точки консольных конструкций; 5) точки, в которых происходит резкое изменение физических или геометрических свойств конструкционных элементов; 6) точки приложения обобщённых сосредоточенных сил; 7) точки, к которым приводится распределенная нагрузка; 8) все точки, в которых будет необходимо определять величины перемещений и составляющие внутренних сил; 9) узловые опорные точки, в которых необходимо определять поэтажные акселерограммы на высотных уровнях иерархического моделирования встроенного в ХОТ-1 технологического оборудования; 10) узловые точки контакта расчётных элементов ХОТ-1 с «землёй».

В заключении укажем, что РДМ здания ХОТ-1 разработана с учётом требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии НП-031-01 [13] и МР.1.5.2.05.999.0025-2011 [14], а также карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 и рекомендаций МАГАТЭ (№ 50-SG-D15, Вена, 1992 г. и № 50-SG-S1, Вена, 1994 г.), при этом сейсмическая опасность района ГХК определяется по карте ОСР-97D для максимального расчётного землетрясения (МРЗ), отвечающей вероятности 99.5% не превышения (или 0.5% возможного превышения) в течение 50 лет расчётной сейсмической интенсивности сотрясений в баллах (б), которая для средних грунтовых условий 2-й категории по СНиП II-7-81* [4] для ПЗ составляет 6,1 б, для МРЗ – 7,6 б.

Литература:

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. Поляков, С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий / С.В. Поляков. – М.: Высш. шк., 1983. – 304 с.
3. РБ 006-1998. Руководство по безопасности. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ / Утв. пост. Госатомнадзора России от 29.12.1998 № 3.
4. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. – М.: Минстрой РФ, 2014. – 125 с.
5. Юзиков, В. П. Строительная механика тонкостенных стержней / В. П. Юзиков, Н. Н. Панасенко. – Под ред. д-ра техн. наук Н. Н. Панасенко. Волгоград: Волгоград. науч. изд-во, 2013. 361 с.
6. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия / Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Минрегионразвития РФ, 2011. – 80 с.
7. НП-064-05. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ОИАЭ / Утв. пост. ФСЭТАН от 20.12.2005 № 16 // М.: ФСЭТАН. 2006. – 51 с.
8. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах / Гл. ред. Страхов В.Н., Уломов В.И. // ОИФЗ РАН. – М.: НПП Текарт, 2000.
9. Юзиков В.П. Расчёт тонкостенных стержней открытого профиля с учётом сдвига срединной поверхности / В.П. Юзиков, О.Б. Завьялова // Новосибирск. – Изв. Вузов: Строительство. 2011. № 1. С. 108 – 115.
10. Панасенко Н.Н. Конечно-элементная модель пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. В 2-х частях. Ч. 1 / Н.Н. Панасенко, В.П. Юзиков, А.В. Синельщиков // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 2. С. 89 – 100.
11. Панасенко Н.Н. Конечно-элементная модель пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. В 2-х частях. Ч. 2 / Н.Н. Панасенко, В.П. Юзиков, А.В. Синельщиков // Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 3. С. 116 – 128.
12. Семенов П.И. Расчёт прочности и деформативности анизотропных тонкостенных стержней открытого профиля. – Киев: Изд-во «Высща школа», 1974. – 184 с.
13. НП 031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций / Утв. пост. ГГТН РФ от 19.10.2001 № 9. - М.: ГГТН РФ. – 27 с.
14. МР 1.5.2.05.999.0025-2011. Расчёт и проектирование сейсмостойких атомных станций: методические рекомендации. – М.: ОАО «РОСЭНЕРГОАТОМ», 2011. – 92 с.

Finite element model of industrial buildings as a system of thin-walled rods of open profile

Matselya V.I.[1,a], Seelev I.N.[1,a], Lekontsev A.V.[1,a], Hafizov R.R.[2,b], Panasenko N.N.[3,c], Sinelschikov A.V.[4,d], Yakovlev P.V.[3,c]

[1]ICP FSUE "MCC", 662972 Zheleznogorsk, Krasnoyarsk, Lenina st., 53
[2]LLC "Geolkom", 662974, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk, v. Dodonova, Lugovaia st., 10
[3]LLC "Lifting constructions", 414056, Astrakhan, Tatishchev st. 16zh
[4]Astrakhan State University of Civil Engineering, 414056, Astrakhan, Tatischeva st., 18
[a]atomlink@mcc.krasnoyarsk.su, [b]geolkom@yandex.ru, [c]psastr@mail.ru, [d]sinelschikov@aucu.ru

Keywords: equation of motion, stiffness matrix, mass matrix, thin-walled rod of open profile, finite element method, finite element, design model, industrial building

The general methodical basis of the computational analysis by the finite elements method of spatial constructions of industrial buildings as systems of thin-walled rods of open profile is presented, theoretical foundations for the construction of mass matrices and rigidities of thin-walled rods are proposed, which are necessary for constructing computed dynamic models of industrial buildings subject to design analysis for dynamic and seismic impacts. The proposed methodological basis complies with the requirements of federal norms and rules in the use of atomic energy NP-031-01, MP.1.5.2.05.999.0025-2011 and IAEA recommendations. The developed methods were used to comprehensively assess the seismic safety of an industrial building and the technological and lifting equipment of the spent nuclear fuel storage (bridge cranes, pipelines, capacitive and pumping equipment) ICP FSUE "MCC" (Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory) for the maximum calculated an earthquake of 7.6 on the MSK-64 scale.

УДК 678.67.02

Трансформация тефлонсодержащих частиц при использовании в двигателе автомобиля

Рогов В.Е. [1,a], Бочектуева Е.Б.[2,b], Пнёва М.А.[3,c]

[1]Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия
[2]Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40в стр. 1, Улан-Удэ, Россия
[3] Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[a]rogov54v@mail.ru, [b]bochektueva.e@yandex.ru, [c]mashapneva1997@gmail.com

Ключевые слова: тефлонсодержащие частицы, двигатель, трение, покрытие, частицы износа

В работе рассмотрены некоторые аспекты трансформации тефлонсодержащих частиц при использовании в двигателе автомобиля. Смазочные жидкости выполняют роль поставщика частиц в зону контакта. В процессе эксплуатации двигателя на поверхностях контакта происходит формирование тонкослойных полимерных покрытий, сглаживающих неровности поверхностей и снижающих изнашивание. Данные покрытия прочно связаны с металлическим основанием и выдерживают нагрев до высоких температур без возникновения дефектов. Результатом использования покрытий является повышение ресурса контактирующих деталей, так как покрытие изнашивается прежде металлического основания. Полимерное защитное покрытие, сформированное на сопряженных деталях, изменяет механизм трения, повышая их ресурс за счет того, что в процессе трения сначала будет изнашиваться покрытие, а затем основной металл. Продукты изнашивания представляют собой удлиненные частицы с размерами, не превышающими нескольких микрометров. Данные частицы продолжают циркулировать в системе смазки и могут вторично закрепляться на поверхностях, образуя новые покрытия. Таким образом, процесс формирования покрытий становится самоподдерживающимся.

Введение. Надежность и долговечность узлов трения во многом определяют качество машиностроительной продукции. Высокая сопротивляемость изнашиванию сопряженных деталей зависит от многих факторов, в том числе от адаптации поверхностных слоев и по-

крытий контактирующих деталей к условиям процесса трения. Наиболее перспективными являются износостойкие покрытия, образующиеся в процессе эксплуатации из ультрадисперсных тефлонсодержащих частиц, вводимых в смазочные жидкости.

Методика. Тефлонсодержащие антифрикционные добавки «Slisk-50», «МикроХ-3», «Superline», «Slider», «Forum» нашли широкое использование в системе смазки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и других механизмов [1, 2] благодаря положительным изменениям в работе двигателя. Влияние на процесс трения таких добавок был рассмотрен в работе [3] на примере конкретного продукта под торговой маркой «Forum». Однако в работе не показано, какие процессы трансформации происходят с полимерными частицами в процессе трения. Для этого покажем формы и размеры тефлоновых частиц «Forum», вводимых в систему смазки автомобиля (рис. 1). Частицы в основном имеют строение сферолита размером 0,5-2,5 мкм. Такие размеры частиц позволяют беспрепятственно циркулировать через фильтр в системах смазки автомобиля.

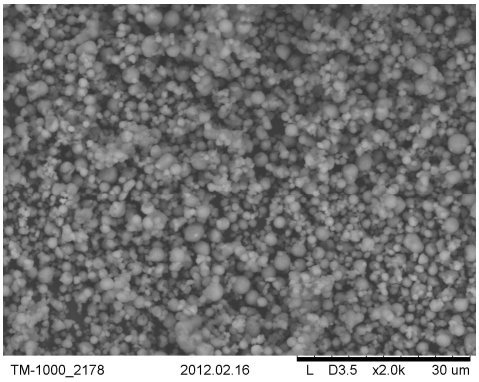


Рис. 1. Размеры и формы частиц «Forum»

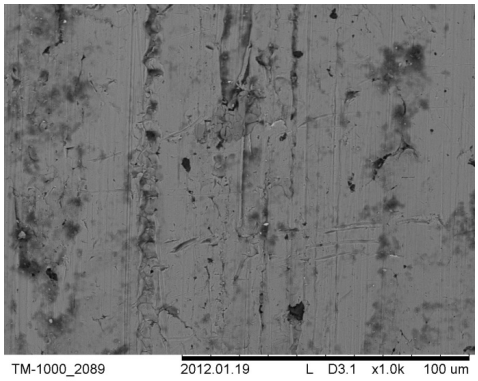


Рис. 2. Рабочая поверхность бронзового подшипника ведущего вала привода масляного насоса

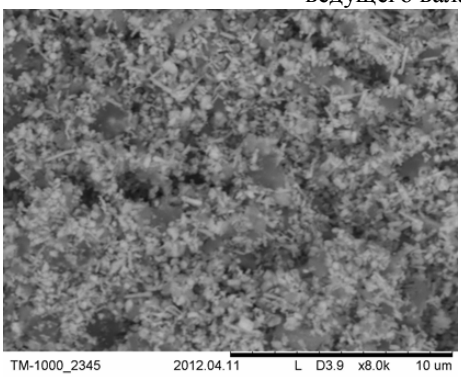


Рис. 3. Продукты изнашивания

Процесс снижения изнашивания в двигателе происходит за счет образования полимерных покрытий на контактирующих поверхностях [3]. На контактирующих поверхностях наблюдается процесс формирования полимерных тонкослойных покрытий, различных по структуре. На рис. 2 представлено ориентированное по направлению движения однородное покрытие, которое распределяется не только по фактической площади контакта, но и по всей поверхности бронзового вкладыша, изготовленного методом порошковой металлургии, изменяя микрорельеф, закрывая впадины и неровности.

При этом тефлоновое покрытие сглаживает неровности металлической поверхности, ориентируется в направлении движения. Согласно микроскопическим исследованиям, проведенным в работе [3], полимерные покрытия можно увидеть только на бронзовой поверхности. На стальных и алюминиевых поверхностях они не просматриваются [4, 5] из-за высокой чистоты обработки металлических поверхностей и повышенной оптической прозрачности фторопласта. В работе [6] установлено, что полимерное покрытие имеет прочную связь с металлической основой. Об этом свидетельствует тот факт, что полимерные покрытия на брон-

зовых образцах выдерживают нагрев до 280 ± 5 °С без видимых изменений в виде отслоений, дефектов и трещин.

Полимерное защитное покрытие, сформированное на сопряженных деталях, изменяет механизм трения, повышая их ресурс за счет того, что в процессе трения сначала будет изнашиваться покрытие, а затем основной металл. На рис. 3 показаны продукты изнашивания полимерного покрытия, полученные из осадка на дне картера двигателя.

Продукты изнашивания представляют собой в основном скатанные тонкие удлиненные частицы, полученные в зазоре сопряжений до их выхода из зоны трения. Диаметр частиц составляет доли микрометра, а длина – не более 2 мкм. Небольшое количество частиц с большой длиной наблюдается в порах масляных фильтров. Они не вносят значительных изменений в работу фильтров. Отсутствие сферических частиц первоначальных размеров свидетельствует о полной их трансформации в тонкослойные покрытия.

Выводы: В статье представлены основные этапы трансформации тефлонсодержащих частиц в зоне трения. Смазочные жидкости при этом выполняют роль поставщика полимерных частиц в зону сопряжений.

Следует отметить, что продукты изнашивания при работе двигателя совместно с маслом продолжают циркулировать в смазочной системе двигателя и могут участвовать в формировании покрытий. В случае вторичного когезионного закрепления частиц на полимерном покрытии можно говорить о процессах самоорганизации трибосистемы, т. е. многократного нанесения–истирания–восстановления покрытий.

Литература:

1. Исхакова Е.П. Использование антифрикционных препаратов в промышленности // Вестник машиностроения. 2008. № 12. С. 30–34.
2. Раднатаров В.Ц., Рогов В.Е., Бохоева Л.А., Лобанов Д.В Исследование работы двигателя легкового автомобиля при применении антифрикционной добавки // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 4. С. 38–42.
3. Radnatarov V.G., Bokhoeva L.A., Rogov V.E. Influence of “Forum” antifrictional additive on engine wear in light vehicles // Russian Engineering Research. 2015. V. 35. № 6. P. 407–410.
4. Балабанов В.И., Бешлемышев В.И., Махонин И.И. Трение, износ, смазка и самоорганизация в машинах. М.: Изумруд, 2004. 192 с.
5. Захаров П.С., Митичук В.Д., Митин П.В., Максимов Б.Н. Экструзионные пленки из фторполимеров // Фторные заметки. 2012. № 6 (85). С. 3–4.
6. Rogov V.E., Bokhoeva L.A., Radnatarov V.Ts. Reducing the wear of motor components by polymer additions // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. № 1. P. 32–34.

Transformation of teflon-containing particles when used in an automobile engine

Rogov V.E [1,a], Bochektueva E.B.[2,b], Pnyova M.A.[3,c]

[1]Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhiyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation
[2]East Siberia State University of Technology and Management, bldg. 1 40v Klyuchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation
[3]Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russian Federation
[a]rogov54v@mail.ru, [b]bochektueva.e@yandex.ru, [c]mashapneva1997@gmail.com

Keywords: teflon-containing particles, engine, friction, coating, wear particles

In this paper, some aspects of the transformation of teflon-containing particles are considered when used in an automobile engine. Lubricating fluids act as a supplier of particles to the contact zone. In the process of engine operation, thin-layer polymer coatings are formed on the contact surfaces, smoothing the uneven surfaces and reducing wear. These coatings are firmly bonded to the metal base and can withstand heating to high temperatures without the occurrence of defects. The result of the use of coatings is an increase in the life of the contacting parts, since the coating wears out before the metal base. The polymeric coating created on the interfaced details changes the friction mechanism, raising their resource because in the course of friction the coating will wear out first and the main metal second. Wear products are elongated particles with dimensions not exceeding several micrometers. These particles continue to circulate in the lubrication system and can be fixed to surfaces again, forming new coatings. Thus, the process of coating formation becomes self-sustaining.

УДК 534.01; 622.24.053; 666.97.033

Вибровращательное погружение рабочего органа в пластическую среду

Коронатов В.А.[a], Герасимов С.Н.[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Россия, Братск
[a]kortavik@mail.ru, [b]sdm_gerasimov@rambler.ru

Ключевые слова: заглаживающая машина, теория погружения, крутильные автоколебания, детерминированный хаос

Моделируется процесс вибропогружения рабочего органа дисковой заглаживающей машины вибрационного типа при выравнивании пластической среды – не затвердевшей поверхности бетонной смеси. Вибропогружение описывается без учета движения диска в горизонтальном направлении вдоль обрабатываемой поверхности, когда заглаживается бетонную смесь в одном месте заданное время. Для выражения динамического характера силы лобового сопротивления в зависимости от скоростей погружения и вращения диска используется аппроксимация Паде. Это позволяет исключить математические некорректности при нулевых значениях скоростей и описывать прерывистость погружения диска, то есть учитывать возможность его кратковременных остановок (заклиниваний). Применяется теория погружения вращающегося твердого тела в грунт для введенной одномассовой динамической модели заглаживающей машины. Приведены результаты численного моделирования процесса подтапливания диска, включая и случаи возникновения детерминированного хаоса. В качестве заглаживающей машины рассматривается модель, созданная на кафедре СДМ БрГУ.

Введение. При проектировании оптимальных параметров и задании режимов работы для дисковой заглаживающей машины вибрационного типа приходится решать две противоречивые задачи. Для увеличения производительности проводимых работ по выравниванию поверхности не застывшей бетонной смеси, а также для задания высокочастотного вибрационного воздействия, следует задавать наибольшую частоту вращения для вала электродвигателя. В то же время, для предотвращения возможностей чрезмерного подтапливания диска следует ограничивать увеличение частоты вращения вала, так как в противном случае технологический процесс будет нарушен. Для решения подобного рода задач предлагается новая динамическая модель заглаживающей машины, которая в отличие от существующих моделей [1, 3-5] учитывает возможность подтапливания не только за счет действия силы тяжести и вибрационной силы, но и вращения диска. Опытные данные говорят о том, что именно вращение заглаживающего диска играет определяющую роль при подтапливании, приводящее к уменьшению сопротивляемости бетонной смеси. В качестве заглаживающей машины рассматривается модель, разработанная и созданная на кафедре СДМ БрГУ одним из авторов статьи [2,3].

Методы исследования. Задачи на погружение вращающегося твердого тела в грунт до недавнего времени считались неразрешимыми задачами механики. Трудности вызывали математические некорректности при нулевых значениях скоростей аналитического выражения для силы лобового сопротивления, выражающей прямую пропорциональную зависимость от линейной скорости погружения и обратную - от угловой скорости вращения тела. Поэтому в подобных задачах, например в бурении, было принято вводить эмпирические соотношения для определения скорости и глубины погружения. В работах одного из авторов [6, 7] этот вопрос был решен с помощью аппроксимации Паде [9-11], что позволило создать теорию погружения и применить ее к задачам бурения. Теория позволяет описывать переходные режимы, в том числе и релаксационные - когда погружение и вращение могут чередоваться с кратковременными остановками. Излагаемый ниже материал – еще одно практическое применение созданной теории.

Описание модели. Для изучения возможности подтапливания рабочего органа заглаживающей машины и возникающих, при этом крутильных автоколебаний, будем исходить из простейшей одномассовой модели (рис.1), которая принципиально никак не отличается от ранее введенной модели для бурильной колонны [6], добавив при этом вибрационную силу $H\sin vt$.

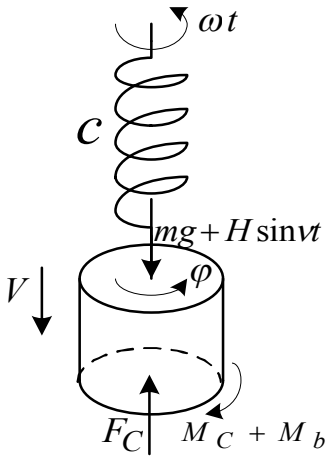


Рис. 1. Динамическая модель заглаживающей машины

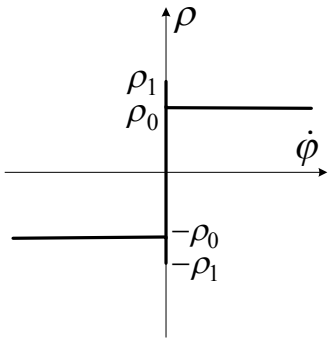


Рис. 2. Закон Кулона

Здесь предполагается, что вал электродвигателя имеет постоянную угловую скорость ω, а через упругое передаточное звено – пружину, вращение передается к заглаживающему диску, угол закручивания которого φ, и на который со стороны забоя действуют момент M_c и сила F_c сопротивления (m, I – соответственно масса заглаживающей машины и осевой момент инерции заглаживающего диска радиуса R); V – текущая скорость подтапливания диска. Упругий момент со стороны упругого передаточного звена, введем согласно закону Гука: $M = -c(\varphi - \omega t)$, где t – текущее время, c – жесткость пружины кручения, определяющая упругие свойства передаточного звена; момент сил вязкого сопротивления M_b примем равным: $M_b = a\dot{\varphi}^2$, где a - коэффициент вязкого сопротивления; точкой обозначена производная по времени t.

Постановка и решение задачи. Задача рассматривается в простейшей постановке, когда диск заглаживает бетонную смесь в одном месте заданное время, то есть без учета движения диска в горизонтальном направлении вдоль обрабатываемой поверхности. Кроме того, предполагается, что диск может кратковременно заклинивать в поступательном движении при погружении и во вращательном. Согласно теории погружения вращающегося твердого тела в грунт, изложенной, например, в работах [6, 7], получим:

$$\begin{cases} \dot{x} \equiv 0, \; npu \;\; |\dot{\varphi}| < \left(\dfrac{n_1}{1 + h\sin vt} - 1\right)\dfrac{\Delta}{bR}; \\ \ddot{x} = g\left(1 + h\sin vt\right) - n_1 g\,\dfrac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta}, \; npu \;\; \dot{x} \geq 0; \\ \dot{\varphi} \equiv 0, \; npu \; c|\varphi - \omega t| < \begin{cases} \rho_1 mg\left(1 + h\sin vt\right), \; npu \;\; \dot{x} \equiv 0; \\ \rho_1 n_1 mg, \; npu \;\; \dot{x} > 0; \end{cases} \\ I\ddot{\varphi} + a\dot{\varphi}^2 sign\,\dot{\varphi} + c\left(\varphi - \omega t\right) = \begin{cases} -\rho_0 mg\left(1 + h\sin vt\right) sign\,\dot{\varphi}, \;\; npu \;\; \dot{x} \equiv 0; \\ -\rho_0 n_1 mg\,\dfrac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta}\, sign\,\dot{\varphi}, \; npu \;\; \dot{x} \geq 0. \end{cases} \end{cases} \tag{1}$$

Остановку погружения диска следует ожидать тогда, когда одновременно будет:

$$\dot{x} = 0 \;\; u \;\; \sigma_{1o} < \sigma \;\; \Leftrightarrow \dot{x} = 0 \;\; u \;\; |\dot{\varphi}| < \left(\frac{n_1}{1 + h\sin vt} - 1\right)\frac{\Delta}{bR}. \tag{2}$$

Остановку вращения диска следует ожидать тогда, когда одновременно будет:

$$\dot{\varphi}=0 \; и \; c\left|\varphi-\omega t\right| \le \begin{cases} \rho_0 mg\left(1+h\sin \nu t\right), \; при \; \dot{x}\equiv 0; \\ \rho_0 n_1 mg\,\dfrac{\dot{x}+\Delta}{\dot{x}+bR\left|\dot{\varphi}\right|+\Delta}, \; при \; \dot{x}\ge 0. \end{cases} \qquad (3)$$

Здесь следует иметь в виду, что в случае не выполнения неравенств условий (2, 3) кратковременных или длительных остановок движения диска в погружении или вращении происходить не будет, а будут лишь мгновенные остановки с продолжением движения.

Дополнительно к обозначениям, введенным в описании модели, принято следующее: точкой обозначена производная по времени t; $x-$ текущая координата погружения заглаживающего диска по отношению к поверхности бетонной смеси $\left(\dot{x}=V\right)$; $h,\nu-$ соответственно приведенная амплитуда и частота вибрационной силы. Здесь и далее естественно считать, что $1+h\sin \nu t>0,$ так как в противном случае может наблюдаться подпрыгивание диска, что не желательно для технологического процесса по выравниванию бетонной поверхности. Угловая скорость может иметь произвольный знак, а линейная скорость погружения всегда положительна, поэтому аналитическая зависимость для силы лобового сопротивления, а значит и для момента сопротивления [8], берется, согласно теории погружения вращающегося твердого тела в грунт [6, 7], в виде аппроксимации Паде такого вида:

$$F_c=F_0\,\frac{\dot{x}+\Delta}{\dot{x}+bR\left|\dot{\varphi}\right|+\Delta}; \; M_c=\rho F_c. \qquad (4)$$

Здесь $b,\Delta-$ коэффициенты полиномиальных членов аппроксимации Паде, которые определяются из экспериментальных характеристик для силы сопротивления бетонной смеси, поверхность которой заглаживается; $R-$ радиус заглаживающего диска; F_0- . коэффициент пропорциональности, подлежащий определению; $\rho-$ удельный момент сопротивления на единицу давления бетонной смеси, который имеет физическую природу близкую к коэффициенту трения скольжения [8] и который будем полагать, изменяется согласно закону Кулона (рис. 2): $\rho=\rho_0 sign\dot{\varphi}, \; при \; \dot{\varphi}\ne 0; \; -\rho_1\le\rho\le\rho_1, \; при \; \dot{\varphi}\equiv 0\left(\varepsilon=\dfrac{\rho_1}{\rho_0}>1\right).$

При кратковременной остановке погружения: $F_0=kmg\left(1+h\sin \nu t\right),$ где $k=1+\dfrac{bR}{\Delta}\left|\dot{\varphi}\right|$ - коэффициент динамичности, возникающий при вращении диска и определяющий влияние вращения заглаживающего диска на силу сопротивления со стороны бетонной смеси. Первое уравнение системы (1) можно представить в таком виде: $\sigma_\partial=\dfrac{\sigma}{k}$, определяющее динамическое напряжение, возникающее в бетонной смеси при вращении диска; здесь $\sigma=\sigma_0\left(1+h\sin \nu t\right)$ – напряжение без учета динамического воздействия, создаваемого вращением диска; $\sigma_0=\dfrac{mg}{\pi R^2}$. Очевидно, что вид приведенного выражения для динамического напряжения не изменится и при определении его предельного значения: $\sigma_{\partial 1}=\dfrac{\sigma_1}{k}$; здесь $\sigma_{\partial 1},\sigma_1$ – предельные динамическое и обычное напряжения. Заглаживающий диск начнет погружаться, как только $\sigma_{\partial 1}=\sigma_0\left(1+h\sin \nu t\right)$. Тем самым в момент начала погружения заглаживающего диска коэффициент динамичности достигает своего предельного значения: $k_*=\dfrac{n_1}{1+h\sin \nu t},$ где $n_1=\dfrac{\sigma_1}{\sigma_0}-$запас прочности бетонной смеси на погружение для заглаживающей машины данного веса. Отсюда критическая угловая скорость заглаживающего диска будет равна: $\left|\dot{\varphi}\right|_*=\left(\dfrac{n_1}{1+h\sin \nu t}-1\right)\dfrac{\Delta}{bR},$ начиная, с которой будет начинаться погружение. Коэффици-

ент F_0 перед началом погружения диска достигнет своего предельного значения: $F_{0*} = n_1 mg$, и при погружении будет оставаться неизменным.

Введем безразмерные переменные и параметры:

$$\tau = \sqrt{\frac{c}{I}}t, \quad \xi = \frac{c}{\rho_0 mg}(\varphi - \omega t), \quad \eta = \frac{c}{b\rho_0 mgR}x;$$

$$\Omega = \frac{\sqrt{cI}}{\rho_0 mg}\omega, \quad \chi = \frac{I}{b\rho_0 mR}, \quad \beta = \frac{a}{\sqrt{cI}}, \quad \delta = \frac{\sqrt{cI}}{b\rho_0 mgR}\Delta, \quad p = \nu\sqrt{\frac{I}{c}}, \quad h = \frac{H}{mg}.$$

Обозначив точкой производную по времени τ, сформулированная задача (1-3) в безразмерном виде запишется $(1 + h\sin p\tau > 0)$:

$$\begin{cases} \dot{\eta} \equiv 0, \quad npu \quad \left|\dot{\xi} + \Omega\right| < \delta\left(\dfrac{n_1}{1 + h\sin p\tau} - 1\right); \\ \ddot{\eta} = \chi(1 + h\sin p\tau) - \chi n_1 \dfrac{\dot{\eta} + \delta}{\dot{\eta} + \left|\dot{\xi} + \Omega\right| + \delta}, \; npu\, \dot{\eta} \geq 0; \\ \dot{\xi} \equiv -\Omega, npu\left|\xi\right| < \begin{cases} \varepsilon(1 + h\sin p\tau), \; npu \;\; \dot{\eta} \equiv 0; \\ \varepsilon n_1, \; npu \;\; \dot{\eta} \geq 0; \end{cases} \\ \ddot{\xi} + \beta\left(\dot{\xi} + \Omega\right)^2 sign\left(\dot{\xi} + \Omega\right) + \xi = \begin{cases} -(1 + h\sin p\tau) sign\left(\dot{\xi} + \Omega\right), \; npu\, \dot{\eta} \equiv 0; \\ -n_1 \dfrac{\dot{\eta} + \delta}{\dot{\eta} + \left|\dot{\xi} + \Omega\right| + \delta} sign\left(\dot{\xi} + \Omega\right), \; npu\, \dot{\eta} \geq 0. \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

Остановка погружения диска будет происходить в моменты, когда одновременно:

$$\dot{\eta} = 0, \quad u \quad \left|\dot{\xi} + \Omega\right| < \delta\left(\frac{n_1}{1 + h\sin\, p\tau} - 1\right); \tag{6}$$

Остановка вращения диска будет происходить в моменты, когда одновременно:

$$\dot{\xi} = -\Omega\, u \left|\xi\right| \leq \begin{cases} 1 + h\sin\, p\tau, npu\, \dot{\eta} \equiv 0; \\ n_1, npu\, \dot{\eta} \geq 0. \end{cases} \tag{7}$$

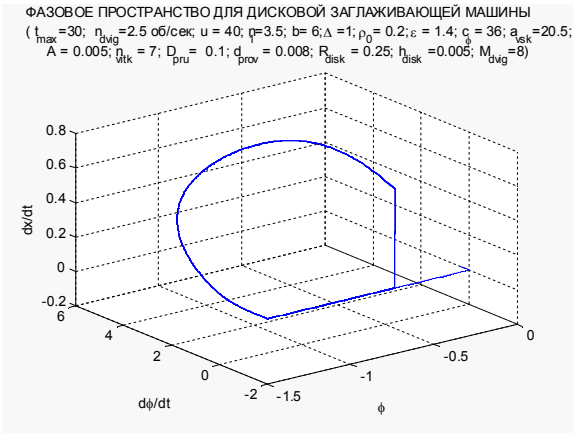
Здесь также следует иметь в виду, что в случае не выполнения неравенств условий (6, 7) кратковременных или длительных остановок движения диска в погружении или вращении происходить не будет, а будут лишь мгновенные остановки с продолжением движения.

Для проведения численных расчетов следует принять во внимание [3, 4] следующее:

$$\omega = \frac{n_{dvig}}{u}; \nu = n_{dvig}\left(1 - \frac{1}{u}\right); H = M_{dvig} A \nu^2; c = \frac{E d_{prov}^4}{32 n_{vitk}\left(D_{pru} + d_{prov}\right)};$$

Здесь n_{dvig}, $M_{dvig}, u, A, D_{pru}, d_{prov}, n_{vitk}$ - соответственно частота вращения и масса двигателя; передаточное число; высота кулачка; диаметры пружины кручения и проволоки, из которой изготовлена пружина; число витков пружины. Дополнительно к этому на приводимых ниже графиках численного счета следует иметь в виду: $c_\varphi = c$, $a_{vsk} = a$; R_{disk}, h_{disk} - радиус и толщина заглаживающего диска; $\phi = \varphi - \omega t$.

Полученные результаты. Система уравнений (5), с учетом условий (6, 7), представляют собой полный алгоритм для проведения численного моделирования происходящих процессов - крутильных автоколебаний заглаживающего диска, с учетом возможностей подтапливания и кратковременных заклиниваний вращательного движения и погружения заглаживающего диска. На рисунках 3 - 6 приведены три примера результатов численного счета: первые два имитируют обычные не хаотичные режимы при конкретных исходных данных, записанных в системе СИ; третий пример – режим детерминированного хаоса в безразмерных величинах. В примерах с размерными величинами исходные данные соответствуют параметрам реальных моделей дисковой заглаживающей машины вибрационного типа, созданных на кафедре СДМ БрГУ [2, 3].



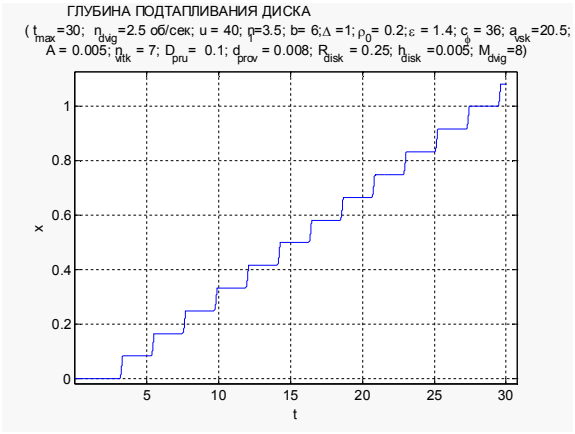
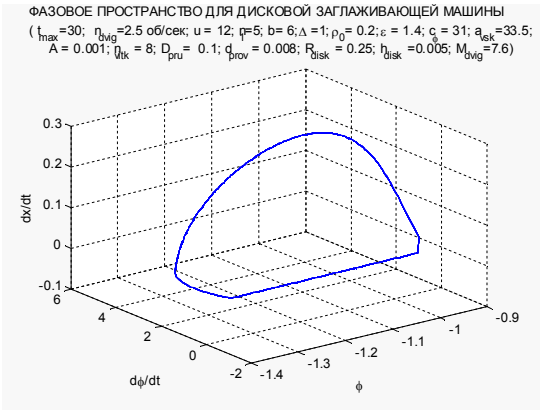


Рис. 3. Пример № 1 обычных не хаотичных автоколебаний заглаживающего диска



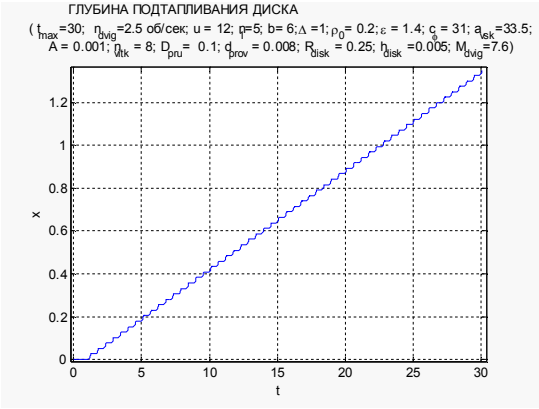
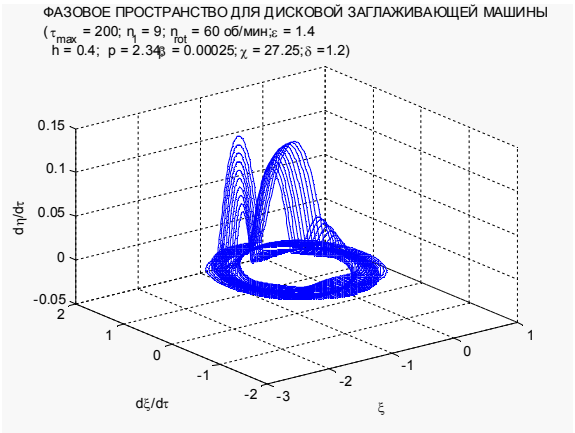


Рис. 4. Пример № 2 обычных не хаотичных автоколебаний заглаживающего диска



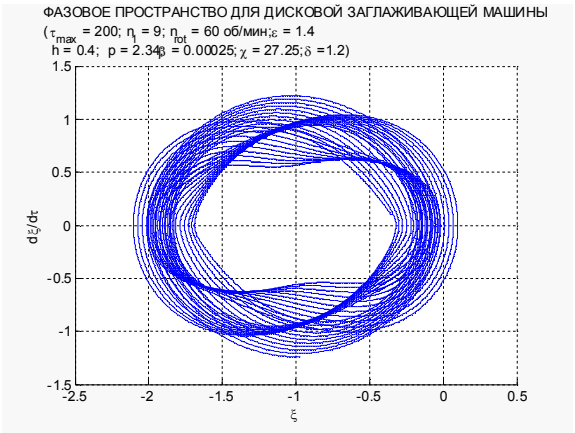
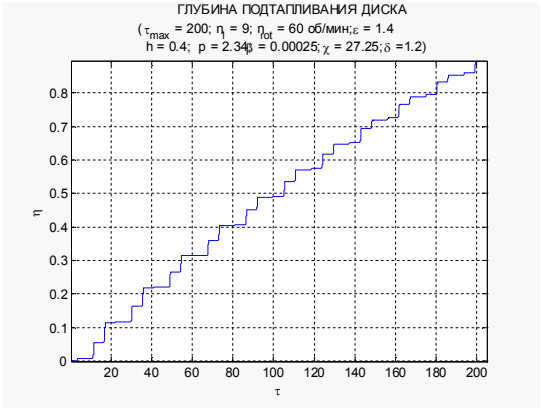


Рис. 5. Пример № 3 хаотичных автоколебаний заглаживающего диска



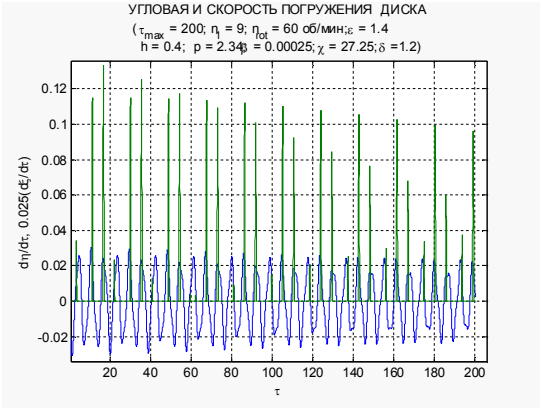


Рис. 6. Пример № 3 (продолжение) хаотичных автоколебаний заглаживающего диска

Выводы: Приведенную теорию и расчетные формулы можно использовать при проектировании и задании оптимальных режимов работы дисковой заглаживающей машины данного типа. Общие принципы теории не изменяться, если в качестве рабочего органа заглаживаемой машины будет выбран не диск, а другое тело.

Литература:

1. Болотный А.В. Заглаживание бетонных поверхностей. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. – (Наука-строит. производству). - 128 с.
2. Рабочий орган заглаживающей машины. Мамаев Л.А., Коронатов В.А., Белокобыльский С.В., Герасимов С.Н. Патент на изобретение. RUS 2182536 20.06.2000.
3. Герасимов С.Н. Определение рациональных параметров и режимов работы вибрационного дискового рабочего органа для обработки бетонных поверхностей : автореферат дис. кандидата технических наук : 05.05.04 / Хабар. гос. техн. ун-т. - Хабаровск, 2003. - 19 с.
4. Белокобыльский С.В., Коронатов В.А., Герасимов С.Н. Динамика взаимодействия дисковой заглаживающей машины с бетонными смесями. – Братск: Изд-во БрГУ, 2014.– 67 с.
5. Мамаев Л.А., Коронатов В.А., Герасимов С.Н., Мазовец С.А. Ручная дисковая заглаживающая машина осциллирующего типа / Вестник государственного технического университета. Вып. 25. Транспорт. Отв. ред. В.Н. Катаргин; Отв. за вып. А.Н. Князьков. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001.– 303с.
6. Коронатов В.А. Новая динамическая модель бурильной колонны и численное описание крутильных автоколебаний во время проходки - углубления забоя скважины // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (25). - С. 48-59.
7. Коронатов В.А. Начала построения строгой теории бурения // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). - С. 83-94.
8. Нагаев Р.Ф., Исаков К.А., Лебедев Н.А. Динамика горных машин. СПб.: Изд-во СППГИ (ТУ), 1996. - 155 с.
9. Андронов А.А., Журавлев В.Ф. Сухое трение в задачах механики. М.; Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотичная механика». Ин-т компьютерных исследований, 2010. - 164 с.
10. Киреенков А.А., Семендяев С.В. Связанные модели трения скольжения и верчения: от теории к эксперименту // Аэрокосмические исследования, прикладная механика: тр. МФТИ. 2010. Т.2, № 3. С.174-181.
11. Бейкер Дж. (мл.), Грейс-Моррис П. Аппроксимация Паде: пер. с англ. М.: Мир, 1986. - 502с.

Vibratory body immersion In a plastic medium

Koronatov V.A.[a], Gerasimov S.N.[b]

Bratsk state university, Makarenko St., 40, Russia, Bratsk
[a]kortavik@mail.ru, [b]sdm_gerasimov@rambler.ru

Keywords: the smoothing-down car, the theory of immersion, tortional self-oscillations, the determined chaos

Process of vibroimmersion of working body of the disk smoothing-down car of vibration type at alignment of the plastic environment - not hardened surface of concrete mix is modelled. Vibroimmersion is described without the movement of a disk in the horizontal direction along the processed surface when the set time is smoothed down concrete mix in one place. For expression of dynamic character of force of front resistance depending on speeds of immersion and rotation of a disk Pade's approximation is used. It allows to exclude mathematical incorrectnesses at zero values of speeds and to describe intermittence of immersion of a disk that is to consider a possibility of his short-term stops (jammings). The theory of immersion of the rotating solid body in soil is applied to the entered one-mass dynamic model of the smoothing-down car. Results of numerical modeling of process of a podtaplivaniye of a disk are given, including also cases of emergence of the determined chaos. As the smoothing-down car the model created at SDM BRGU department is considered.

КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

УДК 629.113

Программный комплекс для численного анализа колебаний подвески автомобиля Часть 1. Построение модели возмущающего воздействия неровностей дороги

Рыков С.П.[a], Коваль В.С.[b], Рыкова О.А.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]RSP7-8-48@rambler.ru, [b]koval.supra@yandex.ru, [c]Olga.tonoyn@mail.ru

Ключевые слова: подвеска автомобиля, колебания, звено сглаживания, случайный микропрофиль дороги, численный анализ, программный комплекс

В статье приводится подробное описание программного комплекса, разработанного для численного анализа колебаний динамических систем, эквивалентных подвеске автомобиля. Даётся блок-схема комплекса и раскрывается содержание отдельных элементов, включая моделирование случайного микропрофиля дорог, моделирование звена переменного сглаживания шиной неровностей дороги, расчет статических и частотных характеристик, моделирование колебаний подвески. В первой части статьи более подробно изложен метод моделирования случайного микропрофиля дороги, включая генерацию «белого» шума, формирование передаточной функции методом факторизации, построение импульсной переходной функции и формирование искомого случайного микропрофиля с заданным видом корреляционной функции, даётся оценка точности и адекватности моделирования. Приводятся диаграммы с нормированными корреляционными функциями для пяти испытательных дорог автополигона НИЦИАМТ смоделированных микропрофилей в сравнении с соответствующими корреляционными функциями, полученными аппроксимацией результатов обработки неровностей реальных дорог автополигона.

Введение. Как было отмечено ранее [9, 11, 15], получение достоверных результатов о функционировании звена переменного сглаживания в составе колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, и оценка влияния на подвеску новой модели сглаживающей способности шины возможны только с использованием численных методов анализа. Такой подход предполагает численное моделирование как функции микропрофиля испытательной дороги, так и уравнений движения колебательной системы при наличии звена переменного сглаживания и обратной связи от элементов подвески на параметр сглаживания этого звена.

Потребность в создании нового программного комплекса обусловлена, во-первых, появлением персональных ЭВМ, обладающих высоким быстродействием, большой оперативной памятью и развитым программным обеспечением, во-вторых, необходимостью ввода в расчеты колебаний подвески новых представлений о работе пневматической шины, в частности: учет упругой неоднородности покрышки, определение стабильности контакта колеса с дорогой и др. и, в-третьих, желанием более объемной и качественной оценки статистических и частотных характеристик исследуемых процессов и систем.

Блок-схема программного комплекса. При разработке программного комплекса ставились следующие задачи:

1) возможность моделирования случайного микропрофиля испытательных дорог автополигона НИЦИАМТа;

2) возможность моделирования различных колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля;

3) возможность исследования колебаний систем с учетом эффекта переменного сглаживания шиной неровностей дороги;

4) возможность ввода новых моделей и переменных коэффициентов для описания работы элементов колебательной системы;

5) получение статистических характеристик входных и выходных процессов и частотных характеристик звеньев и системы в целом;

6) оценка степени нелинейности звеньев и колебательной системы в целом при вводе новой модели;

7) оценка точности и адекватности моделируемых процессов и исследуемых колебательных систем.

Блок-схема разработанного программного комплекса, получившего название REKS, приведена на рис. 1. Весь комплекс разбит на три блока.

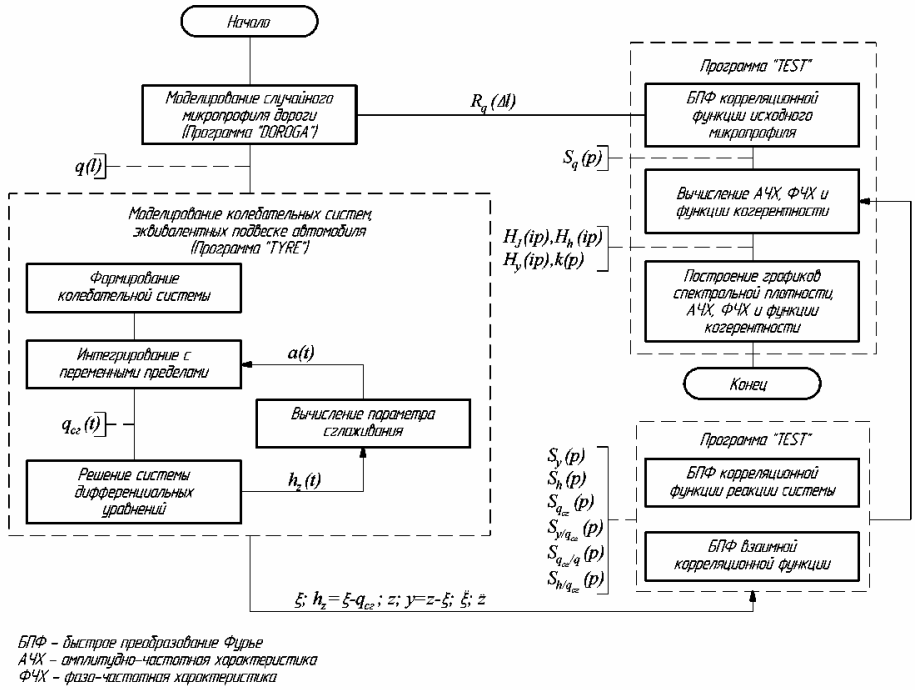


Рис.1. Блок-схема программного комплекса REKS численного моделирования колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля

Первый блок "DOROGA" направлен на моделирование случайного микропрофиля дороги по заданному виду корреляционной функции, второй "TYRE" - моделирование колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля, с учетом эффекта переменного сглаживания шины, третий "TEST" - вычисление статистических и частотных характеристик входных и выходных процессов, звеньев и колебательной системы в целом.

В первом блоке программного комплекса вначале генерируется "белый" шум с единичной спектральной плотностью, затем строятся характеристики формирующего фильтра, включая передаточную и импульсную переходную функции, и далее определяются ординаты искомого микропрофиля. По результатам моделирования микропрофиля проводится оценка точности и адекватности моделирования путем вычисления коэффициентов множественной корреляции для корреляционных функций смоделированного и исходного процессов.

Во втором блоке комплекса организован ввод параметров и формирование колебательной системы подвески. Далее осуществляется смена аргумента функции микропрофиля, смоделированного в первом блоке, интерполирование микропрофиля на длине отпечатка полиномом третьей степени (сплайн-функцией третьего порядка), интегрирование на переменной длине пятна контакта шины и вычисление производных функции сглаженного микропрофиля и переменных коэффициентов. Получив реализации производных ординат сглаженного микропрофиля, решается система дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутта четвертого порядка, в результате чего определяется динамический прогиб шины. Затем по

динамическому прогибу вычисляется длина пятна контакта, организуется цикл обратной связи на пределы интегрирования и вычисляются значения функции сглаженного микропрофиля на интервалах $a(t)$.

При вычислении статистических и частотных характеристик колебательной системы вначале рассчитываются автокорреляционные функции входного воздействия и реакций системы, а также взаимные корреляционные функции этих процессов. Затем, используя быстрое преобразование Фурье от корреляционных функций, получаются спектральные и взаимные спектральные плотности, а на основе их вычисляются амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики и функции когерентности. Итогом работы третьего блока является построение графиков корреляционных функций, спектральных плотностей, амплитудно-частотных, фазо-частотных характеристик и функций когерентности.

Моделирование случайного возмущающего воздействия микропрофиля специальных дорог. Микропрофиль автомобильных дорог и качество подвески автомобиля являются важнейшими факторами, определяющими плавность хода, скорость и безопасность движения автомобиля. Правильным расчетом параметров подвески и выбором допустимых значений характеристик ровности дорожной поверхности, колебания автомобиля могут быть сведены к оптимальному минимуму.

В последние годы к расчету автомобильной подвески стали применять методы статистической динамики, которые позволяют учесть случайный характер распределения неровностей на дорожной поверхности. Эти методы в сочетании с вычислительными машинами позволяют теоретически решать различные задачи о вертикальных колебаниях, нагруженности конструкции, устойчивости движения и управляемости автомобиля.

Непосредственно в практике инженерной и научной деятельности при проектировании таких колебательных систем, как системы подрессоривания и виброзащиты автомобиля, особенно при вводе в расчет новых моделей функционирования элементов подвески и шин, наиболее целесообразно использовать при формировании внешнего воздействия численное моделирование случайного микропрофиля дорог, идентичного по своим характеристикам микропрофилю испытательных дорог автополигонов или дорог общего пользования.

Такой подход, подкрепленный соответствующим программным обеспечением персональных ЭВМ, является эффективным инструментом для исследования динамических систем автомобиля при его движении в различных режимах и в самой общей постановке, т.е. при случайном воздействии и наличии нелинейных связей.

Имея модель случайной функции, эквивалентной микропрофилю реальной дороги, исследователь может уже на стадии проектного задания оценить параметры системы подрессоривания автомобиля, в т.ч. частотные характеристики, а также их изменение при вводе в расчеты новых представлений о колебательной системе, эквивалентной подвеске, или выявление наиболее целесообразных диапазонов изменения ее параметров.

Суть проблемы моделирования случайного микропрофиля реальной дороги заключается в получении импульсной переходной (весовой) функции формирующей динамической системы, которая при подаче на вход системы сигнала типа "белый шум" преобразовывала бы его в случайный процесс с заданной корреляционной функцией вида:

$$\rho(\tau) = A_1 e^{-\alpha_1|\tau|} + A_2 e^{-\alpha_2|\tau|} \cos\beta|\tau|, \qquad (1)$$

где $\rho(\tau)$ - нормированная корреляционная функция; A_1 , A_2 - коэффициенты влияния составляющих, для которых должно соблюдаться условие $A_1 + A_2 = 1$; α_1, α_2 - коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности случайного процесса; β - частота периодической составляющей со случайными амплитудой и фазой; τ - интервал корреляции по времени.

Такая аналитическая форма корреляционной функции является наиболее употребительной и представительной при аппроксимации эмпирических значений корреляционных функций микропрофилей испытательных дорог и дорог общего пользования, полученных путем статистической обработки результатов нивелирования микропрофилей с заданным шагом. Блок-схема алгоритма процесса моделирования случайного микропрофиля представ-

лена на рис. 2

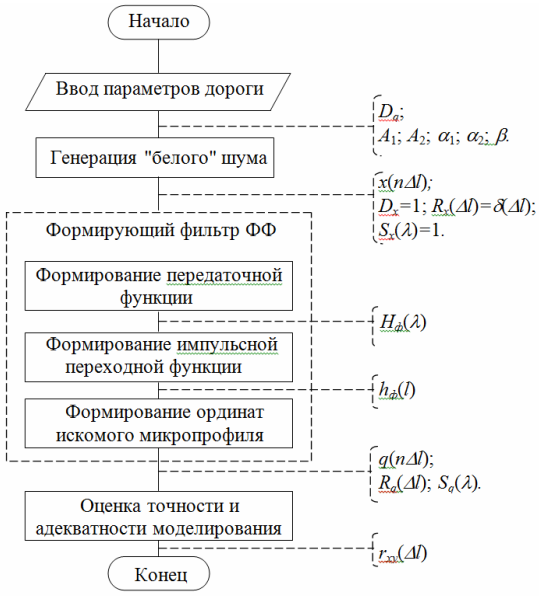


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования случайного микропрофиля автомобильных дорог

Генерация белого шума. Белый шум есть случайный стационарный процесс с независимыми значениями функции при различных значениях аргумента (т.е. "белый" шум имеет нормальное Гауссово распределение плотности вероятности), с корреляционной функцией в виде δ - функции Дирака:

$$R_x(\tau) = R_0\,\delta(t - \tau), \qquad (2)$$

где R_0 - дисперсия или интенсивность белого шума (для упрощения принимают R_0=1), и с постоянной спектральной плотностью:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = 1 \quad (\text{при } R_0 = 1). \qquad (3)$$

Моделирование белого шума с единичной интенсивностью (дисперсией) осуществляется по формуле:

$$x = m + \sigma\,\eta,$$

где η – случайная величина; m – математическое ожидание (для нормального распределения m = 0); σ – среднее квадратическое отклонение (для нормального распределения и единичной дисперсии σ = 1).

На основании центральной предельной теоремы случайная величина η, определяемая по выражению:

$$\eta^{(n)} = \sqrt{\frac{12}{n}} \sum_{i=1}^{n} (a_i - 0{,}5), \qquad (4)$$

где a_i – независимые случайные величины, равномерно распределенные на интервале 0...1 (генерируются ЭВМ по стандартной программе); n – предел суммирования; является асимптотически нормальной с параметрами (0, 1). Легко заметить, что $M\eta^{(n)} = 0$, $D\eta^{(n)} = 1$.

Особенно удобным является значение n = 12, так как $\eta^{(12)} = \sum_{i=1}^{12} (a_i - 0{,}5)$.

Обычно считают, что случайная величина $\eta^{(12)}$ практически нормальна. Улучшить моделирование можно, вводя нелинейную поправку:

$$x = \eta + \frac{1}{20 \cdot 12}(\eta^3 - 3\eta). \qquad (5)$$

Построение передаточной функции методом факторизации. Поскольку спектральная плотность случайного стационарного процесса и его корреляционная функция связаны интегралом Фурье, т.е.

$$S_q(\lambda)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_q(\Delta l)e^{-i\lambda\Delta l}d(\Delta l), \tag{6}$$

где λ – волновая частота микропрофиля, то для корреляционной функции вида

$$R_q(\Delta l)=D_q(A_1e^{-\alpha_1|\Delta l|}+A_2e^{-\alpha_2|\Delta l|}\cos\beta|\Delta l|) \tag{7}$$

где D_q – дисперсия ординат микропрофиля, спектральная плотность имеет вид:

$$S_q(\lambda)=\frac{D_q}{\pi}\left[A_1\frac{\alpha_1}{\lambda^2+\alpha_1^{\,2}}+0{,}5A_2\frac{\alpha_2}{(\lambda-\beta)^2+\alpha_2^{\,2}}+0{,}5A_2\frac{\alpha_2}{(\lambda+\beta)^2+\alpha_2^{\,2}}\right] \tag{8}$$

Приведем выражение (8) к общему знаменателю. Тогда

$$S_q(\lambda)=k_0^2\frac{\lambda^4+c_1\lambda^2+c_2}{(\lambda^2+\alpha_1^2)[(\lambda-\beta)^2+\alpha_2^2][(\lambda+\beta)^2+\alpha_2^2]}, \tag{9}$$

или

$$S_q(\lambda)=k_0^2\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)},$$

Найдем корни полиномов, стоящих в числителе $S_1(\lambda)$ и знаменателе $S_2(\lambda)$ выражения (9), чтобы представить спектральную плотность в виде дробно-рациональной функции.

В результате спектральная плотность выходного процесса может быть выражена следующей дробно-рациональной функцией

$$S_q(\lambda)=k_0^2\frac{S_1(\lambda)}{S_2(\lambda)}=k_0^2\frac{[\lambda-(a_2+ib_2)][\lambda+(a_2+ib_2)][\lambda+(a_2+ib_2)]}{(\lambda-i\alpha_1)[\lambda-(\beta+i\alpha_2)][\lambda+(\beta-i\alpha_2)]}\frac{[\lambda-(a_2+ib_2)]}{(\lambda+ia_1)[\lambda-(\beta-ia_2)][\lambda+(\beta+ia_2)]} \tag{10}$$

Для линейных систем автоматического регулирования имеет место соотношение между спектральными плотностями на входе и выходе системы – уравнение Винера-Хинчина:

$$S_q(\lambda)=\left|H_\phi(i\lambda)\right|^2S_x(\lambda). \tag{11}$$

Поскольку в данном случае $S_x(\lambda)=1$, то получаем:

$$\left|H_\phi(i\lambda)\right|^2=S_q(\lambda), \tag{12}$$

где $\left|H_\phi(i\lambda)\right|$ – модуль передаточной функции формирующего фильтра.

Зная выражение спектральной плотности в виде дробно-рациональной функции (10), можно представить формулу (12) в виде

$$\left|H_\phi(i\lambda)\right|^2=k_0^2\frac{S_1(i\lambda)}{S_2(i\lambda)}=k_0^2\frac{H_1(i\lambda)H_1(-i\lambda)}{H_2(i\lambda)H_2(-i\lambda)}. \tag{13}$$

Разложение спектральной плотности на множители вида (10) или (13) называется факторизацией.

Порядок проведения факторизации следует из теоремы о разложении неотрицательных дробно-рациональных функций на множители. Согласно этой теореме всякая неотрицательная дробно-рациональная относительно ω функция:

$$\frac{G_1(\omega)}{G_2(\omega)}=c'\frac{\prod_{k=1}^{l1}(\omega-\omega'_{1k})}{\prod_{k=1}^{m1}(\omega-\omega'_{2k})}$$

может быть представлена в виде:

$$\frac{G_1(\omega)}{G_2(\omega)}=c\left|\frac{\prod_{k=1}^{l}(\omega-\omega'_{1k})}{\prod_{k=1}^{m}(\omega-\omega'_{2k})}\right|^2,$$

где c', c - некоторые константы; $G_1(\omega)$, $G_2(\omega)$ - полиномы степеней $l1$ и $m1$, причем $m1>l1$, $m>l$; ω_{1k},ω_{2k} - те из корней $\omega'_{1k},\omega'_{2k}$ в первоначальном представлении дробно-рациональной функции, которые лежат в верхней полуплоскости.

Тогда искомая передаточная функция с учетом выражений (10) и (13) запишется в виде:

$$H_{\phi}(i\lambda) = k_0 \frac{[(\lambda + b_2) - i\alpha_2][(\lambda + b_2) + i\alpha_2]}{(\lambda + \alpha_1)[(\lambda + \alpha_2) - i\beta_2][(\lambda + \alpha_2) + i\beta_2]}, \quad (14)$$

где $\lambda_{11} = -b_2 + ia_2; \lambda_{12} = -b_2 - ia_2;\ \lambda_{21} = -a_1; \lambda_{22} = -a_2 + i\beta; \lambda_{23} = -a_2 - i\beta.$

Построение импульсной переходной функции. Поскольку импульсная переходная функция и передаточная функция динамической системы связаны через интеграл Лапласа выражением:

$$h_{\phi}(l) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} H_{\phi}(i\lambda)e^{\lambda l}dl,$$

то его можно представить в виде суммы согласно теореме разложения:

для кратных корней

$$h(l) = \sum_{\gamma=1}^{s}\sum_{\mu=1}^{r_{\mu}-1} c_{\gamma\mu}\frac{l^{\mu}}{\mu}e^{\lambda_{\gamma} l} \quad (15)$$

где λ_{γ} – полюсы передаточной функции кратности r_{μ}, причем

$$r_1 + r_2 + ... + r_s = m;\ c_{\gamma\mu} = \frac{1}{r_{\gamma} - \mu - 1}\frac{d^{r_{\gamma}-\mu-1}}{d\lambda^{r_{\gamma}-\mu-1}}\left[H_{\phi}(\lambda)(\lambda - \lambda_{\gamma})^{r_{\gamma}}\right];\ \lambda = \lambda_{\gamma};$$

для различных корней

$$h(l) = \sum_{i=1}^{n}\frac{A_m(\lambda_i)}{B'_n(\lambda_i)}e^{\lambda_i l} \quad (16)$$

где λ_i – полюсы передаточной функции $\lambda_1 = -\alpha_1;\ \lambda_2 = -\alpha_2 + i\beta;\ \lambda_3 = -\alpha_2 - i\beta$.

Разложим входящие в уравнение (16) полиномы на множители и подставим значения корней. Тогда импульсная переходная функция запишется в виде:

$$h(l) = k_0\left[\frac{A_1}{B_1}e^{-\alpha_1 l} + \frac{A_2}{B_2}e^{-\alpha_2 l}e^{i\beta l} + \frac{A_3}{B_3}e^{-\alpha_2 l}e^{-i\beta l}\right]. \quad (17)$$

Поскольку A_2, B_2, A_3, B_3 комплексные числа, то необходимо произвести деление комплексных чисел A_2/B_2, A_3/B_3.

Произведя необходимые преобразования, получим окончательное выражение импульсной переходной функции в виде:

$$h(l) = k_0\left[\frac{A_1}{B_1}e^{-\alpha_1 l} + 2e^{-\alpha_2 l}(\gamma_0\cos\beta l - \mu_0\sin\beta l)\right]. \quad (18)$$

Формирование искомого случайного процесса с заданным видом корреляционной функции. Связь между выходным процессом $q(l)$ и входным шумом $x(l)$ может быть выражена через импульсную переходную характеристику следующим интегралом свертки:

$$q(l) = \int_0^{\infty} h(\Delta l)x(l - \Delta l)d(\Delta l). \quad (19)$$

Поскольку "белый" шум физически реализовать невозможно, то используют "розовый" шум с полосой $(-\omega_0, +\omega_0)$. Тогда с достаточной точностью интеграл можно представить в виде:

$$q(l) = \int_0^{l} h(\Delta l)x_0(l - \Delta l)d(\Delta l), \quad (20)$$

где нормальный шум $x_0(l)$ имеет конечную дисперсию, равную $\sigma^2 = \omega_0/\pi$ (площадь прямоугольника с основанием $2\omega_0$ и высотой $1/\pi$) и некоррелированные значения в точках $l_n = n\Delta l = n\pi/\omega_0$.

Интеграл (20) можно заменить суммой при малой длине интервала Δl

$$q(n) = q(n\Delta l) = \Delta l\sum_{k=0}^{n} h[k\Delta l]x[n-k] = \sum_{k=0}^{n} c_k x[n-k],$$

где $h[k\Delta l]$ – дискретные значения импульсной переходной характеристики формирующего фильтра; c_k - формирующие коэффициенты, определяемые соотношением:

$$c_k = \Delta l \sigma h[k\Delta l] = \sqrt{\Delta l} h[k\Delta l]; \quad (21)$$

$x[n]$ – независимые случайные числа с нормальным распределением в интервале (0...1).

Разложение (21) возможно, поскольку любую функцию можно представить в виде:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} x(\tau_k)\delta(t-\tau_k)\Delta,$$

где Δ – интервал действия импульса.

Окончательно имеем выражение случайной функции, эквивалентной случайному микропрофилю дороги с заданным видом корреляционной функции (1):

$$q(n\Delta l) = \sqrt{\Delta l}\sum_{k=0}^{n} h[k\Delta l]x[n-k], \quad (22)$$

где $h[k\Delta l]$ – дискретные значения весовой функции, определяемые по формуле (18) через равные интервалы Δl.

Оценка точности моделирования. Корреляционная функция реализации $x(m)$ при задержке по длине Δln вычисляется по ряду x_m в виде:

$$R_{xx}(\Delta l\, n) = \frac{1}{ND-n}\sum_{m=1}^{ND-n} x_m x_{m+n}, \quad n = 0, 1, 2, ..., ND,$$

где n является сдвигом, а ND – максимальным сдвигом. Для получения несмещенной оценки корреляционной функции деление в правой части уравнения следует производить на $ND - n$.

Точность моделирования микропрофиля дороги можно оценить коэффициентом множественной корреляции r_{xy}. Коэффициент корреляции между корреляционной функцией смоделированного микропрофиля и эмпирически рассчитанной называется коэффициентом множественной корреляции и рассчитывается по следующей формуле:

$$r_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k} X_i Y_i \sum_{i=1}^{k} X_i Y_i}{\sum_{i=1}^{k} X_i^2 \sum_{i=1}^{k} Y_i^2};$$

где X_i - i-тое значение корреляционной функции смоделированного микропрофиля; Y_i - i-тое значение эмпирически рассчитанной корреляционной функции реального микропрофиля.

Если считать достаточным для приближенного определения функции отклика возможность различения в поле данных хотя бы 2…3 градаций, то из этого следует, что приемлемым значением коэффициента корреляции r_{xy} является значение, большее чем 0,9...0,96. Весь же диапазон изменения r_{xy} от 0 до 0,9 соответствует тому, что в полосе данных невозможно достоверно различить даже двух градаций изменения искомой функции отклика. Если в результате решения диффузной задачи по модели, назначенной волевым образом, получен коэффициент корреляции $r_{xy} < 0{,}9$, то задачу нельзя считать окончательно решеной.

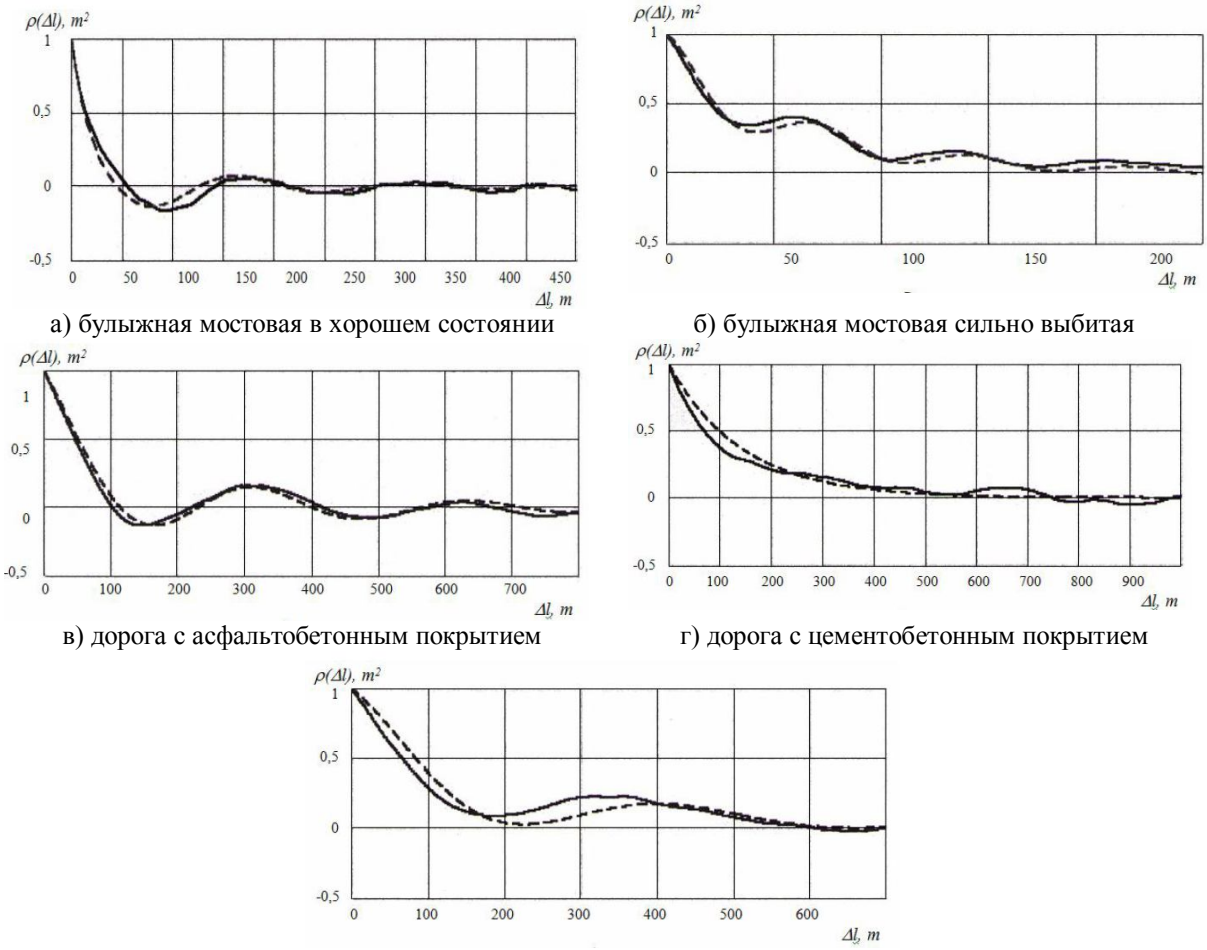
Таблица 1

Параметры корреляционных функций испытательных дорог

Тип дороги	Значение параметра					
	D_q, мм^2	A_1	A_2	α_1, м$^{-1}$	α_2, м$^{-1}$	β, м$^{-1}$
1. Булыжная мостовая в хорошем состоянии	204	0,75	0,25	1,500	0,15	0,750
2. Булыжная мостовая сильно выбитая	1076	0,80	0,20	0,320	0,20	1,740
3. Дорога с асфальтобетонным покрытием	64	0,65	0,35	0,250	0,06	0,393
4. Дорога с цементо-бетонным покрытием	25	1,00	0,00	0,140	0,00	0,000
5. Дорога грунтовая разбитая	4706	0,55	0,45	0,085	0,08	0,285

С использованием разработанного программного комплекса были вычислены массивы ординат микропрофилей пяти наиболее интенсивно эксплуатируемых испытательных дорог НИЦИАМТа (г. Дмитров). Параметры дорог представлены в таблице 1.

На рис. 3 представлены результаты расчета в виде нормированных корреляционных функций в сравнении с корреляционными функциями, полученными обработкой результатов геодезической съемки реального профиля дорог.



а) булыжная мостовая в хорошем состоянии

б) булыжная мостовая сильно выбитая

в) дорога с асфальтобетонным покрытием

г) дорога с цементобетонным покрытием

д) дорога грунтовая разбитая

Рис. 3. Графики нормированных корреляционных функций для испытательных дорог (окончание): (- эмпирическая кривая; - - - смоделированная кривая)

Выводы. Анализ приведенных диаграмм и, в первую очередь, корреляционных функций смоделированных микропрофилей в сравнении с аппроксимирующими графиками, а также функций коэффициентов множественной корреляции дает основания сделать следующие выводы:

1) разработанный метод моделирования случайных процессов с заданным видом корреляционной функции, позволяет достаточно точно и адекватно отразить все особенности микропрофилей широко используемых испытательных дорог автополигона;

2) корреляционные функции смоделированного и реального процессов практически совпадают на начальном отрезке;

3) практически совпадают координаты первого пересечения корреляционных функций с осью абсцисс;

4) достаточно хорошо совпадают периоды гармонических составляющих корреляционных функций и последующие точки их пересечений с осью абсцисс;

5) коэффициенты множественной корреляции изменяются в пределах $0{,}9 < r_{xy} < 1$ для всего диапазона реализаций, что также говорит о хорошей адекватности и сходимости смоделированного процесса к исходному.

Таким образом, можно сделать заключение, что смоделированные случайные процессы вполне адекватно отражают случайные микропрофили пяти автомобильных испытательных дорог с известными параметрами корреляционных функций и могут быть использованы при дальнейших исследованиях колебательных систем, эквивалентных подвеске автомобиля, в качестве входного воздействия.

Литература:

1. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др.; Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.

3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

4. Водяник И.И. Выбор моделей для аналитического описания взаимодействия пневматической шины с дорогой // Автомобильная промышленность. – 1980. – №10. – С. 18–19.

5. Дмитриев А.А., Шупляков В.С., Яценко Н.Н. Особенности взаимодействия пневматической шины с микропрофилем дороги // Автомобильная промышленность. – 1973. – №5. – С.27–30.

6. Ланин В.И. Деформация и гистерезис эластичной шины колеса // Известия вузов: Машиностроение. – 1959. – №3. – С. 156–168.

7. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.В. Кленников, И.П. Петров и др.; Под ред. В.И. Кнороза. – М. – Транспорт, 1976. – 238 с.

8. 8. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

9. Рыков С.П. Моделирование и оценка поглощающей и сглаживающей способности пневматической шины в расчетах подвески, плавности хода и подрессоривания автомобиля: Монография. – Братск: БрГТУ, 2004. – 124с.

10. Рыков С.П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин. Испытательный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов: Монография. – Братск: БрГТУ, 2004. – 322с.

11. Рыков С.П. Методы моделирования и оценки поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин в расчетах подвески и колебаний колесных машин: Автореферат диссертации на соискании ученой степени доктора технических наук. – М.: ФГУП «НАТИ», 2005. – 44с.

12. Рыков С.П. Совершенствование моделирования демпфирующих свойств шин и элементов подрессоривания для проектирования автомобилей / С.П. Рыков, В.Н. Тарасюк, С.Е. Фрейберг // Проектирование колесных машин: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 197-209.

13. Рыков С.П. Моделирование случайного микропрофиля автомобильных дорог / С.П.Рыков, Р.С. Бекирова, В.С. Коваль // Системы. Методы. Технологии. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. - №4(8). – С.33-37.

14. Рыков С.П. Неупругое сопротивление в пневматических шинах. Моделирование, оценка, приложения: монография. – Братск: Изд-во БрГУ, 2015. – 444 с.

15. Рыков С.П., Коваль В.С. Исследование выходных характеристик пневматических шин. Сглаживающая способность // Системы. Методы. Технологии. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. - №3 (7).- С. 22 - 30.

16. Рыков С.П. Сглаживающая способность пневматических шин. Моделирование и оценка / С.П. Рыков, В.С. Коваль: Монография; Братский гос. ун-т. Братск, 2012. 168 с.; илл. библиогр. 68 назв. Рус. Деп. в ВИНИТИ 22.04.2013г., №119, В2013.

Program complex for numerical analysis of oscillations of a car suspension
Part 1. Build a model of the disturbance irregularities in the road

Rykov S.P.[a], Koval V.S.[b], Rykova O.A.[c]

Bratsk state University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]RSP7-8-48@rambler.ru, [b]koval.supra@yandex.ru , [c]Olga.tonoyn@mail.ru

Keywords: vehicle suspension, vibrations, the level of smoothing random white-road, numerical analysis, software package

The article provides a detailed description of the software, designed for numerical analysis of vibrations of dynamical systems, equivalent to the suspension of the vehicle. Given the block diagram of the complex and reveals the contents of individual elements, including simulation of random white roads, the modeling of the link variable smoothing tire and road defects, calculation of static and frequency characteristics, modeling of oscillations of the suspension. In the first part of the article in more detail, the method of simulation of random white road, including the generation of "white" noise shaping transfer function method factorization, plotting the impulse response function and the formation of the desired random white-with a given form of a correlation function that assesses the accuracy and adequacy of the simulation. Provides a chart of the normalized correlation functions for five test roads of the testing ground nitsiamt simulated microprofiles in comparison with the corresponding correlation functions obtained by approximation of results of processing of the irregularities of the real roads of the testing ground.

УДК 629.113

Программный комплекс для численного анализа колебаний подвески автомобиля
Часть 2. Моделирование эффекта переменного сглаживания шиной неровностей дороги

Рыков С.П.[a], Коваль В.С.[b], Рыкова О.А.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]RSP7-8-48@rambler.ru, [b]koval.supra@yandex.ru, [c]Olga.tonoyn@mail.ru

Ключевые слова: подвеска автомобиля, колебания, звено сглаживания, случайный микропрофиль дороги, численный анализ, программный комплекс

В статье приводится подробное описание программного комплекса, разработанного для численного анализа колебаний динамических систем, эквивалентных подвеске автомобиля. Даётся блок-схема комплекса и раскрывается содержание отдельных элементов, включая моделирование случайного микропрофиля дорог, моделирование звена переменного сглаживания шиной неровностей дороги, расчет статических и частотных характеристик, моделирование колебаний подвески. Во второй части статьи более подробно обосновывается эквивалентная колебательная система, отражаются тонкости взаимодействия шины с неровностями дороги, когда длина пятна контакта имеет переменное значение; даются закономерности для вычисления статических и частотных характеристик колебаний подвески, приводятся диаграммы с амплитудно-частотными характеристиками подвески и спектральные плотности вертикальных ускорений на переднем сиденье легкового автомобиля. Делается вывод о правильности выведенных закономерностей функционирования звена переменного сглаживания шины.

Введение. Отработка новой модели сглаживающей способности шины для проверки правильности теоретических положений, принятых при ее математическом описании, а также разработка методов расчетной оценки сглаживающего эффекта должны осуществляться на такой колебательной системе, которая была бы достаточно простой для анализа и узна-

ваемой как в аналитическом выражении, так и в графическом отображении своих частотных характеристик, и одновременно представительно отражала основные свойства колебательной системы автомобиля в целом. Такой динамической системой, формирующей независимые вертикальные колебания на рессорах и шинах передней или задней частей автомобиля, является система, эквивалентная подвеске. Эта система постоянно используется для расчетов колебаний, плавности хода и нагруженности элементов ходовой части автомобиля, а также при проектировании и расчете конструкции самой подвески. И только после всестороннего исследования модели на примере подобной колебательной системы, и уяснения влияния вносимого ею эффекта сглаживающей способности шины на результаты расчетов можно вводить новую модель в математическое описание эквивалентных систем автомобиля любого порядка сложности для их решения и анализа.

Построение математической модели подвески с учетом эффекта переменного сглаживания шины. Построение функциональной схемы колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, учитывающей особенности новой модели сглаживающей способности шины, и составление уравнений движения ее масс будем основывать на следующих допущениях:

1) скорость качения колеса по дороге принимается постоянной;

2) поверхность дороги считается абсолютно жесткой;

3) колебания неподрессоренных масс в вертикальной плоскости не ведут к потере контакта шины с опорной поверхностью дороги;

4) характеристики воздействия микропрофиля неровной дороги на колеса левого и правого борта автомобиля принимаются одинаковыми;

5) колебания подрессоренных масс передней и задней частей автомобиля считаются независимыми;

6) динамическая система, эквивалентная подвеске, представляется двумя сосредоточенными массами с упругими и диссипативными связями между собой, которые перемещаются в вертикальной продольной плоскости. Кроме того, сюда необходимо включить допущения, отражающие новую модель сглаживающего эффекта шины, а именно:

7) пневматическая шина обладает свойствами сосредоточенного упруго-демпфирующего элемента с коэффициентами нормальной жесткости и поглощения энергий вертикальных колебаний;

8) пневматическая шина моделируется тонкой, идеально эластичной оболочкой, которая плотно облегает все неровности в зоне контакта;

9) длина пятна контакта шины определяется параметрами эквивалентной колебательной системы и непрерывно изменяется в процессе перемещения ее масс.

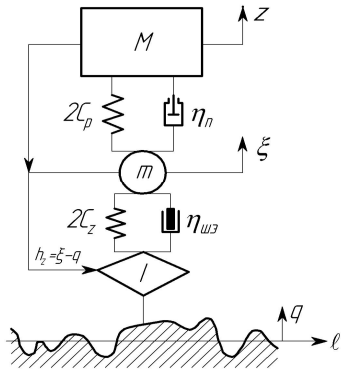


Рис. 1. Функциональная схема колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, с учетом поглощающей и сглаживающей способности шин:

M – приведенная подрессоренная масса, приходящаяся на подвеску; $2C_p$ – суммарный коэффициент нормальной жесткости упругих элементов подвески; η_n – коэффициент суммарного сопротивления в подвеске; m – неподрессоренная масса; $2C_z$ – суммарный коэффициент нормальной жесткости шин; $\eta_{шэ}$ – эквивалентный коэффициент вязкого сопротивления в шинах; $H_ш$, n – параметры эллиптическо-степенной модели; z, ξ – вертикальные перемещения подрессоренной и неподрессоренной масс; q – текущее значение ординат микропрофиля поверхности дороги под осью колес; J – звено сглаживания

Учитывая эти допущения и особенности отражения эллиптическо-степенной модели поглощающей способности шин, функциональная схема, эквивалентная передней или задней подвеске двухосного автомобиля массового производства с учетом новой модели сглаживающей способности шины, может быть представлена в виде, согласно рис. 1.

Как следует из рисунка, традиционная колебательная система, эквивалентная подвеске автомобиля, с учетом модели переменного сглаживания шины дополнена новым звеном – звеном сглаживания *J*, которое расположено между дорогой и шиной и осуществляет осреднение входного воздействия дороги на переменном интервале. Кроме того, в традиционной системе организована обратная связь от всех звеньев колебательной системы к звену сглаживания, отражающая функциональную зависимость параметра осреднения (длины пятна контакта) от выходного параметра системы – нормального прогиба шины.

Математическое описание такой динамической системы кроме двух линейных дифференциальных уравнений второго порядка, отражающих динамику двухмассовой колебательной системы, включает также интегральное уравнение с переменными пределами интегрирования, отражающее динамику звена сглаживания, и, в общем случае, нелинейное алгебраическое уравнение обратной связи на параметр звена сглаживания. С учетом обозначений рис. 1 система уравнений, описывающих движение масс колебательной системы и функционирование звена сглаживания, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + \eta_n(\dot{z} - \dot{\xi}) + 2C_p(z - \xi) = 0, \\ m\ddot{\xi} + \eta_{ш}(\dot{\xi} - \dot{q}_{сг}) + 2C_z(\xi - q_{сг}) - \eta_n(\dot{z} - \dot{\xi}) - 2C_p(z - \xi) = 0, \\ q_{сг}(l) = \dfrac{1}{a(l)} \int\limits_{l-a(l)/2}^{l+a(l)/2} q(l)dl, \\ a(l) = F(h_z). \end{cases} \quad (1)$$

С точки зрения теории автоматического регулирования рассматриваемая колебательная система (рис. 1) является замкнутой системой автоматического регулирования (САР) с обратной связью на параметр, состоящая из четырех звеньев: звена переменного сглаживания, звена смены аргумента, колебательного звена второго порядка и звена обратной связи. Обратная связь организована с выхода системы по нормальному прогибу шины на параметр осреднения звена сглаживания. На вход системы подается случайный стационарный сигнал с нормальным законом распределения, пропорциональный смещению ординат микропрофиля дороги.

Структурная схема такой системы автоматического регулирования изображена на рис. 2.

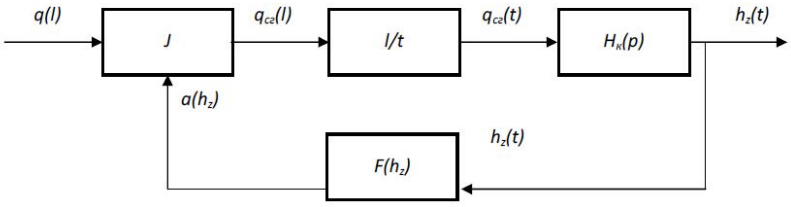


Рис. 2. Структурная схема САР, эквивалентная колебательной системе передней (задней) подвеске автомобиля, с учетом модели переменного сглаживания шины:
J – звено переменного сглаживания; l/*t* – звено смены аргумента; $H_к(p)$ – колебательное звено второго порядка; $F(h_z)$ – звено обратной связи; $q(l)$, $q_{сг}(l)$, $q_{сг}(t)$ – функции исходного и сглаженного микропрофиля; $h_z(t)$ – функция деформации шины; $a(h_z)$ – функция параметра сглаживания

В случае линейных стационарных систем, на вход которых подается воздействие в виде случайной стационарной функции с известными статистическими характеристиками (корреляционной функцией или спектральной плотностью), задача анализа успешно решается, поскольку удается получить аналитические выражения передаточных функций и частотных характеристик системы, в том числе и звена сглаживания, как и статистических характеристик сигналов на выходе.

Для нелинейных систем автоматического регулирования аналитические методы статистической динамики линейных САР не пригодны. Методы нелинейной статистической ди-

намики еще не разработаны в достаточной для инженерных приложений степени и носят, как правило, частный характер. Поэтому, для исследования модели переменного сглаживания шины и ее влияния на выходные характеристики колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, были выбраны численные методы анализа. Эти исследования предусматривали численное моделирование случайного микропрофиля испытательных дорог, численное решение интегрального уравнения, системы дифференциальных уравнений и алгебраического уравнения, вычисление статистических характеристик входных и выходных сигналов, а также передаточных функций и частотных характеристик звеньев и системы в целом с использованием разработанного программного комплекса.

Анализ функциональной и структурной схем, а так же уравнений движения колебательной системы, эквивалентной подвеске автомобиля, позволяет предложить следующую последовательность процесса ее моделирования:

1) вводятся параметры колебательной системы, эквивалентной подвеске конкретного автомобиля;

2) задается интервал моделирования L, количество точек моделирования $n = 0...ND$ и определяется шаг моделирования по длине: $\Delta l = L / ND$;

3) задается скорость движения автомобиля и определяется шаг моделирования по времени: $\Delta t = \Delta l / V_a$;

4) вводится массив ординат микропрофиля конкретной дороги, вычисленный ранее, и с учетом скорости движения автомобиля, пересчитывается в массив возмущающего воздействия дороги.

Прежде чем перейти к дальнейшим этапам моделирования колебаний подвески, необходимо определиться с начальными условиями взаимодействия шины с неровностями дороги и системой координат для отсчета начального прогиба шины.

Будем считать, что перед въездом на случайный микропрофиль дороги колесо катится по абсолютно ровной поверхности без колебаний, при этом шина деформирована под действием нормальной нагрузки на величину статического прогиба и имеет начальное значение длины пятна контакта, величина которого определяется только радиальной нагрузкой, внутренним давлением воздуха и размерами колеса. Значения статического прогиба шины и начальной длины пятна контакта можно вычислить по эмпирическим зависимостям [11, 14, 15, 16].

Для удобства вычисления текущих значений нормального прогиба шины при взаимодействии колебательной системы с микропрофилем дороги, будем принимать за начальное (нулевое) положение колеса то, которое соответствует статическому прогибу шины. Тогда изменение прогиба в процессе колебаний масс подвески будет происходить в пределах от $-h_{zcm}$ (фактически $h_z = 0$, т.е. отрыв) до $+h_{zcm}$ (фактически $h_z = 2h_{zcm}$). Далее:

5) вычисляется функция возмущающего воздействия дороги на переменной длине пятна контакта шины (интервале осреднения) путем численного интегрирования дискретных значений функции воздействия исходного микропрофиля. В результате получается функция воздействия сглаженного микропрофиля дороги;

6) решается система дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих непосредственно колебания масс эквивалентной системы подвески, относительно нормального прогиба шины $h_z(t)$ при возмущающем воздействии $q_{cz}(t)$;

7) вычисляется новое значение длины пятна контакта шины, соответствующее данному значению нормального прогиба, с использованием либо аналитических, либо эмпирических соотношений;

8) новое значение длины пятна контакта учитывается в параметрах интегрирующего звена и производится вычисление нового значения функции воздействия сглаженного микропрофиля дороги;

9) процесс циклических вычислений функции воздействия сглаженного микропрофиля, реакций колебательной системы (h_z, а так же z, ξ, x и др.), и длины пятна контакта шины

продолжается до завершения движения системы по заданному участку дороги. Полученный массив ординат функций $h_z, x, z, \xi, \ddot{z}, \ddot{\xi}$ и является тем результатом моделирования, который реализуется в данном подразделе. Он служит исходным материалом для получения статистических характеристик процессов и частотных характеристик моделируемой системы и ее звеньев.

Схема алгоритма моделирования колебаний подвески с учетом эффекта переменного сглаживания шины представлена на рис. 3.

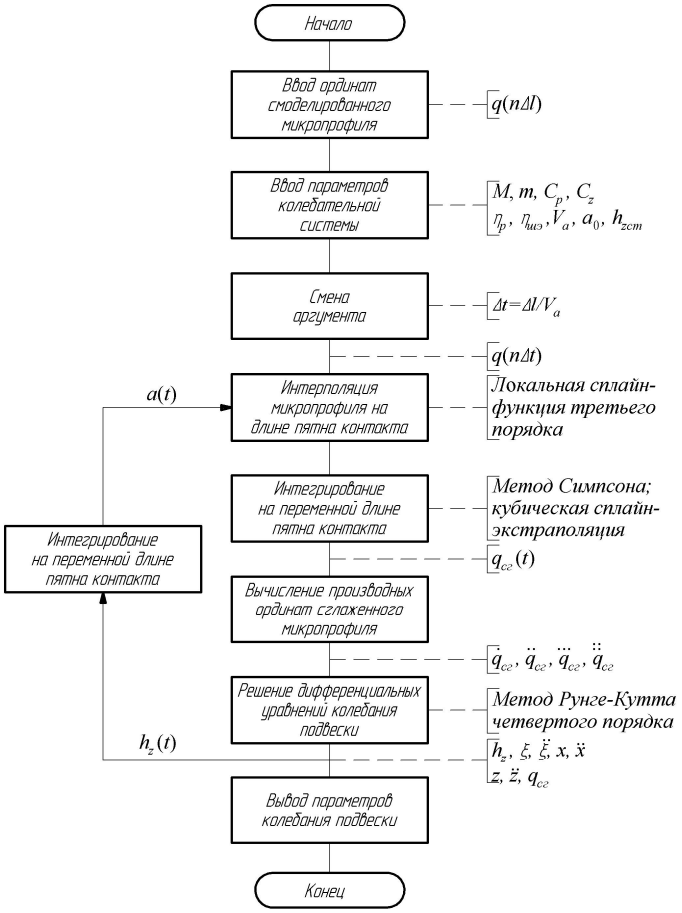


Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования движения подвески с учетом эффекта переменного сглаживания шины

В программном комплексе REKS определяются следующие статистические характеристики случайных процессов:

1) средние значения и средние квадраты;
2) корреляционные функции;
3) спектральные плотности;
4) взаимные корреляционные функции;
5) взаимные спектральные плотности;
6) частотные характеристики (амплитудно-частотные и фазочастотные);
7) функции когерентности.

Результаты моделирования колебаний подвески. При помощи разработанного программного комплекса рассчитаны и построены амплитудно-частотные характеристики звена переменного сглаживания колебательной системы, эквивалентной передней подвеске легкового автомобиля высшего класса ЗИЛ, для двух вариантов входного воздействия, в качестве которого моделировался микропрофиль испытательных дорог автополигона НИЦИАМТа: с асфальтобетонным покрытием (D_q = 64 мм^2) и булыжной мостовой в хорошем состоянии (D_q = 204 мм^2). Результаты представлены на рис. 4 и 5.

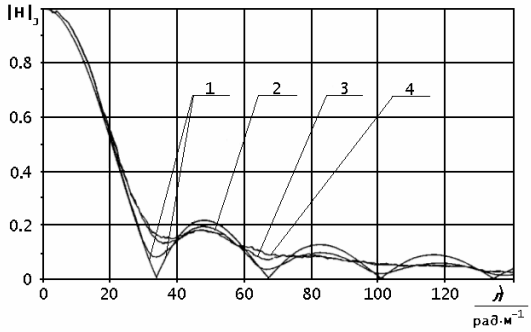


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики звена сглаживания:
1 - при постоянном интервале осреднения ($a = const$); 2, 3, 4 - при переменном интервале осреднения ($a = var$) при движении по дороге с асфальтобетонным покрытием; 2 - V_a = 10 км/ч; 3 - V_a = 80 км/ч; 4 - V_a = 120 км/ч

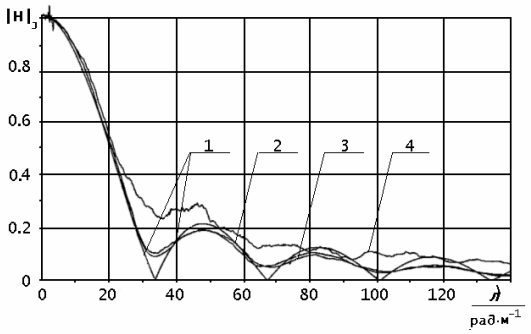


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики звена сглаживания:
1 - при постоянном интервале осреднения ($a = const$); 2, 3, 4 - при переменном интервале осреднения ($a = var$) при движении по булыжной мостовой; 2 - V_a = 10 км/ч; 3 - V_a = 80 км/ч; 4 - V_a = 120 км/ч

Анализ диаграмм показывает, что амплитудно-частотные характеристики звена переменного сглаживания (кривые 2, 3, 4) при малых значениях волновой частоты λ микропрофиля, когда длина неровностей дороги больше длины пятна контакта шины при статической нагрузке на колесо, практически не отличаются от соответствующей характеристики звена постоянного сглаживания. Однако с ростом волновой частоты отличие этих характеристик становится весьма существенным. Причем частота, при которой отличие начинает проявляться, зависит от скорости автомобиля: чем выше скорость, тем меньше значение частоты. Кроме того, частота проявления отличий зависит и от дисперсии ординат микропрофиля дороги: чем больше дисперсия дороги, тем раньше (т.е. при меньшей частоте) расходятся кривые АЧХ.

Выводы. Таким образом, новая модель переменного сглаживания шиной неровностей дороги проявляется в существенном изменении амплитудно-частотной характеристики звена сглаживания, вид которой определяется параметром осреднения *a(l)* - длиной пятна контакта и зависит от скорости движения автомобиля и дисперсии ординат микропрофиля дороги. Изменение амплитудно-частотных характеристик звена переменного сглаживания происходит от одного предельного состояния при $V_a = 0$, когда она описывается уравнением постоянного сглаживания, к другому состоянию, близкому к отрыву шин от опорной поверхности дороги, когда она описывается уравнением огибающей. Знание закономерностей функционирования звена переменного сглаживания открывает возможности для более точного расчета основной характеристики любой системы подрессоривания – ее передаточной функции, причем по отношению как к передаточной функции модели постоянного сглаживания, так и к передаточной функции в виде огибающей этой передаточной функции, аналитическое выражение которой получается из чисто умозрительных соображений с целью избежать обращения характеристики в ноль для некоторых значений частоты воздействия микропрофиля.

Литература:

1. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др.; Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.

3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

4. Водяник И.И. Выбор моделей для аналитического описания взаимодействия пневматической шины с дорогой // Автомобильная промышленность. – 1980. – №10. – С. 18–19.

5. Дмитриев А.А., Шупляков В.С., Яценко Н.Н. Особенности взаимодействия пневматической шины с микропрофилем дороги // Автомобильная промышленность. – 1973. – №5. – С.27–30.

6. Ланин В.И. Деформация и гистерезис эластичной шины колеса // Известия вузов: Машиностроение. – 1959. – №3. – С. 156–168.

7. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз, Е.В. Кленников, И.П. Петров и др.; Под ред. В.И. Кнороза. – М. – Транспорт, 1976. – 238 с.

8. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

9. Рыков С.П. Моделирование и оценка поглощающей и сглаживающей способности пневматической шины в расчетах подвески, плавности хода и подрессоривания автомобиля: Монография. – Братск: БрГТУ, 2004. – 124с.

10. Рыков С.П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин. Испытательный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов: Монография. – Братск: БрГТУ, 2004. – 322с.

11. Рыков С.П. Методы моделирования и оценки поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин в расчетах подвески и колебаний колесных машин: Автореферат диссертации на соискании ученой степени доктора технических наук. – М.: ФГУП «НАТИ», 2005. – 44с.

12. Рыков С.П. Совершенствование моделирования демпфирующих свойств шин и элементов подрессоривания для проектирования автомобилей / С.П. Рыков, В.Н. Тарасюк, С.Е. Фрейберг // Проектирование колесных машин: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 197-209.

13. Рыков С.П. Моделирование случайного микропрофиля автомобильных дорог / С.П. Рыков, Р.С. Бекирова, В.С. Коваль // Системы. Методы. Технологии. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. - №4(8). – С.33-37.

14. Рыков С.П. Неупругое сопротивление в пневматических шинах. Моделирование, оценка, приложения: монография. – Братск: Изд-во БрГУ, 2015. – 444 с.

15. Рыков С.П., Коваль В.С. Исследование выходных характеристик пневматических шин. Сглаживающая способность // Системы. Методы. Технологии. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. - №3 (7).- С. 22 - 30.

16. Рыков С.П. Сглаживающая способность пневматических шин. Моделирование и оценка / С.П. Рыков, В.С. Коваль: Монография; Братский гос. ун-т. Братск, 2012. 168 с.; илл. библиогр. 68 назв. Рус. Деп. в ВИНИТИ 22.04.2013г., №119, В2013.

Program complex for numerical analysis of oscillations of a car suspension Part 2. Modeling the effect of variable smoothing tire unevenness road

Rykov S.P.[a], Koval V.S.[b], Rykova O.A.[c]

Bratsk state University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]RSP7-8-48@rambler.ru, [b]koval.supra@yandex.ru , [c]Olga.tonoyn@mail.ru

Keywords: vehicle suspension, vibrations, the level of smoothing random white-road, numerical analysis, software package

The article provides a detailed description of the software, designed for numerical analysis of vibrations of dynamical systems, equivalent to the suspension of the vehicle. Given the block diagram of the complex and reveals the contents of individual elements, including simulation of random white roads, the modeling of the link variable smoothing tire and road defects, calculation of static and frequency characteristics, modeling of oscillations of the suspension. In the second part of the article more substantiates the equivalent vibrating system, reflected the subtleties of the interaction of the tire with the irregularities of the road, when the length of the contact patch is variable; the patterns are given for the calculation of static and frequency characteristics of oscillations of the suspension, provides a chart with amplitude and frequency characteristics of the suspension and of the spectral density of vertical accelerations in the front seat of the car. The conclusion about the correctness of the derived regularities of the functioning of the link variable smoothing tires.

УДК 621.313.333: 62-83

Оценка влияния несинусоидальности напряжения питания на пульсации электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока

Пустоветов М.Ю.

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону, Россия
mgsn2006@rambler.ru

Ключевые слова: отказы подшипников, знакопеременные циклические нагрузки, пульсации электромагнитного момента, трёхфазный асинхронный двигатель, вспомогательный электропривод, несимметричное несинусоидальное питающее напряжение

Приводятся результаты компьютерного моделирования электромагнитного момента асинхронного вспомогательного двигателя НВА-55 электровоза переменного тока «Ермак». Ввиду несимметричной несинусоидальной системы электрических напряжений, электромагнитный момент кроме постоянной составляющей содержит спектр временных гармоник в диапазоне частот от 10 Гц до 700 Гц. Производится сравнение с результатами моделирования при допущении синусоидальности питающих напряжений с сохранением их не симметрии. Полученные результаты свидетельствуют о том, что основной вклад в формирование пульсаций электромагнитного момента вносит несимметрия системы напряжений питания. Учет несинусоидальности напряжения ухудшает ситуацию: увеличивается коэффициент пульсаций момента, но не радикально, наибольшие гармоники момента остаются на тех же частотах. То есть, с точки зрения влияния на пульсации динамического вращающего момента, которые вызывают циклические знакопеременные нагрузки, приводящие к усталостному разрушению металла подшипников асинхронных двигателей, основной причиной является несимметрия питающих напряжений, а уже во вторую очередь – их несинусоидальность.

Известна проблема отказов трехфазных вспомогательных асинхронных двигателей (АД) электровозов переменного тока из-за неисправностей подшипниковых узлов. Данные статистики по этой теме приведены в [1], где методами математического моделирования режимов работы АД в составе вспомогательного электропривода электровоза «Ермак» при допущении питания АД несимметричной системой синусоидальных напряжений частотой 50 Гц установлено, что имеют место весьма значительные пульсации электромагнитного момента $M_{эм}$, а значит и динамического момента на валу, который передается на подшипники, что может приводить к их повреждениям и разрушению. Известно, что при несимметрии системы синусоидальных питающих напряжений частотой 50 Гц в спектре $M_{эм}$ появляется гармоника частотой 100 Гц [2 - 4]. Также в [1] на рис. 1 показаны опытные осциллограммы напряжений и токов вспомогательного электропривода электровоза 2ЭС5К «Ермак», оснащенного емкостным расщепителем фаз (РФ), полученные специалистами ОАО «ВЭлНИИ» (г. Новочеркасск). Видно, что эти кривые содержат спектр гармонических составляющих. Возник вопрос о степени влияния несинусоидальности напряжения питания на пульсации $M_{эм}$ АД. Настоящая статья призвана дать ответ на поставленный вопрос.

Схема питания трехфазных АД в составе вспомогательного электропривода предусматривает, что одно из линейных напряжений поступает на клеммы АД от обмотки собственных нужд тягового трансформатора, то есть является навязанным. Это напряжениеU_{12}. Два других линейных напряжения U_{23} и U_{31} формируются емкостным или электромеханическим РФ (в зависимости от модификации вспомогательного электропривода) [5, 6]. В ходе поездки электровоза форма сигнала U_{12} может изменяться. Но даже при одинаковой форме U_{12} сигналы U_{23} и U_{31} могут видоизменяться в зависимости от ряда факторов: количества одновременно работающих АД, режима работы АД, подключенного или отключенного со-

стояния пусковой ступени конденсаторов. Поскольку отсутствуют исчерпывающие данные о режимах работы АД во время снятия осциллограмм, приведенных на рис. 1 в [1], например, неизвестны их частоты вращения, то не имеется возможности полной имитации ситуации. В связи с этим ограничимся моделированием на ЭВМ работы одного мотор-вентилятора электровоза с АД типа НВА-55, для чего используем математическую модель, описанную в [7, 8]. Будем сравнивать результаты моделирования при подаче U_{12} в соответствии с формой, показанной на рис. 1 в [1], со случаем, когда подается U_{12} синусоидальной формы с амплитудой и фазой первой гармоники несинусоидального сигнала: $u_{12} = 520{,}8189\sin(314t - 65{,}0498^{\circ})$ В. Сформированная в ходе математического моделирования для случая емкостного РФ система трехфазных линейных несинусоидальных напряжений при установившемся режиме работы исправного АД НВА-55 и отключенной пусковой ступени конденсаторов показана на рис. 1.

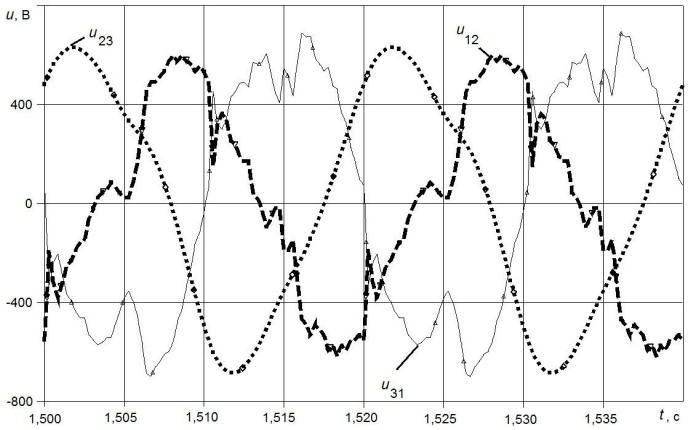


Рис. 1. Сформированная в ходе математического моделирования для случая емкостного РФ система трехфазных линейных несинусоидальных напряжений при установившемся режиме работы исправного АД типа НВА-55 и отключенной пусковой ступени конденсаторов

Таблица 1

Сопоставление результатов моделирования $M_{эм}$ исправного АД типа НВА-55 при установившемся режиме работы и отключенной пусковой ступени конденсаторов

f, Гц	Амплитуда гармоники электромагнитного момента, %	
	При питании несимметричной системой синусоидальных напряжений	При питании несимметричной системой несинусоидальных напряжений
0	100,0 $M_{ср} = 266{,}705$ Нм	100,0 $M_{ср} = 266{,}533$ Нм
50	нет	90,4
100	181,2	111,9
150	нет	3,1
200		63,7
250		10,1
300		12,4
350		5,3
400		11,3
600		4,4
	$m_{max} = 749{,}571$ Нм $m_{min} = -216{,}939$ Нм $k_П = 1{,}812$	$m_{max} = 702{,}347$ Нм $m_{min} = -375{,}982$ Нм $k_П = 2{,}023$

Сравним сначала для вышеописанных условий результаты моделирования $M_{эм}$ исправного АД НВА-55 (см. табл. 1). Будем сопоставлять спектры $M_{эм}$, а также коэффициенты пульсации $M_{эм}$ [9, 10]: $k_П = \dfrac{m_{max} - m_{min}}{2M_{ср}}$, (1)

где m_{max} и m_{min} – наибольшее и наименьшее значения $M_{эм}$; $M_{ср}$ – среднее значение (постоянная составляющая).

Результаты моделирования $M_{эм}$ и момента нагрузки $M_с$ показаны на рис. 2 для случая питания АД системой напряжений согласно рис. 1.

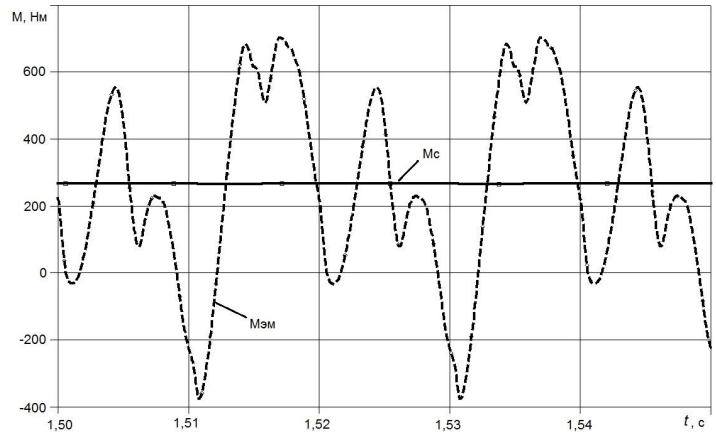


Рис. 2. Результаты моделирования $M_{эм}$ и момента нагрузки $M_{с}$ для случая питания АД системой напряжений согласно рис. 1

Далее проведем сопоставление результатов моделирования $M_{эм}$ в установившемся режиме работы АД НВА-55, на роторе которого имеются разрывы четырех стержней беличьей клетки, при условии, что пусковая ступень конденсаторов емкостного РФ остается постоянно подключенной (см. табл. 2). В табл. 1 и 2 не учтены гармонические составляющие с амплитудами менее 3 %.

Таблица 2

Сопоставление результатов моделирования $M_{эм}$ в установившемся режиме работы АД типа НВА-55, на роторе которого имеются разрывы четырех стержней беличьей клетки, при постоянно подключенной пусковой ступени конденсаторов

f, Гц	Амплитуда гармоники электромагнитного момента, %	
	При питании несимметричной системой синусоидальных напряжений	При питании несимметричной системой несинусоидальных напряжений
0	100,0 $M_{ср}$ = 220,822 Нм	100,0 $M_{ср}$ = 219,685 Нм
10	163,9	162,1
20	5,1	5,0
40	нет	32,0
50		42,7
60		6,6
70	3,7	4,5
80	161,6	157,1
90	819,3	815,2
100	1226,6	1255,8
110	15,5	25,1
140	нет	9,4
150		20,8
190		14,6
200		38,2
250		4,3
300		9,9
320		3,1
390		3,2
400		8,0
600		4,6
700		3,4
	m_{max} = 4747,9 Нм m_{min} = -4984,7 Нм $k_{П}$ = 22,037	m_{max} = 4817,4 Нм m_{min} = -5171,2 Нм $k_{П}$ = 22,734

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основной вклад в формирование пульсаций $M_{эм}$ вносит не симметрия системы напряжений питания. Учет не синусоидальности напряжения ухудшает ситуацию: увеличивается коэффициент пульсаций момента, но не радикально, наибольшие гармоники момента остаются на тех же частотах. То есть, с точки зрения влияния на пульсации динамического вращающего момента, которые вызывают циклические знакопеременные нагрузки, приводящие к усталостному разрушению металла подшипников АД, основной причиной является несимметрия питающих напряжений, а уже во вторую очередь – их несинусоидальность.

Литература:

1. Пустоветов М.Ю. Пульсации электромагнитного момента трехфазной асинхронной электрической машины, работающей в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока – фактор, способствующий отказам подшипников // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 331 – 337.
2. Lamia Youb. Effects of Unbalanced Voltage on the Steady State of the Induction Motors // International Journal of Electrical Energy. 2014. Vol. 2, No. 1. Pp. 34-38.
3. Sobhan Ghanbari. Performance Evaluation of Three-Phase Induction Motor Fed by unbalanced voltage Using Complex Voltage Unbalance Factor // Journal of Engineering and Interdisciplinary Research. 2014. No. 1 (2). Pp. 6-13.
4. Ali Ebadi, Mohammad Mirzaie, Sayyed Asghar Gholamian. Torque Analysis of Three-Phase Induction Motor under Voltage Unbalance Using 2D FEM // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3, No. 2. Pp. 871-876.
5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Т.1 (в четырех книгах) (издание первое). Ростов н/Д: СХКТБ ООО «БелРусь», 2007. 160 с.
6. Худоногов А.М., Макаров В.В., Смирнов В.П. и др. Проектирование привода вспомогательных механизмов ЭПС с асинхронным двигателем: учеб. пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. 311 с.
7. Пустоветов М.Ю. Моделирование асинхронных вспомогательных машин электровозов. Анализ режимов работы, поиск причин отказов. Saarbrucken, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 166 с.
8. Пустоветов М.Ю. Подход к реализации на ЭВМ математической модели асинхронного двигателя, предназначенной для использования в качестве составной части моделей электротехнических комплексов и систем // Моделирование. Теория, методы и средства: материалы 16-ой Междунар. науч.-практ. конф., посв. 110-летию Южно-Рос. гос. политехнич. ун-та (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, 6-7 дек. 2016 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2016. С. 332 – 344.
9. Талья И.И., Пустоветов М.Ю. О пульсации электромагнитного момента асинхронного тягового двигателя в пусковом режиме // Известия вузов. Сер. Электромеханика. 1998. № 4. С. 34 – 37.
10. Пустоветов М.Ю. Совершенствование методов расчёта асинхронных тяговых двигателей с целью улучшения их энергетических характеристик и снижения пульсаций электромагнитного момента: автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.09.01. Новочеркасск, 1999. 20 с.

Evaluation of the effect of non-sinusoidal voltage to ripple of the electromagnetic torque of three-phase induction motor, operating as a part of the auxiliary electric drive onboard of AC electric locomotive

Pustovetov M.Yu.

mgsn2006@rambler.ru
Don State Technical University (DSTU), 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

Keywords: bearing failures, alternating cyclic loads, electromagnetic torque ripple, three-phase AC induction motor, the auxiliary electric drive, unbalanced non-sinusoidal supply voltage

Paper deals with the results of the computer simulation of electromagnetic torque of the NVA-55 type auxiliary induction motors of AC electric locomotive "Ermak". Due to the unbalanced non-sinusoidal system of voltages, the electromagnetic torque in addition to DC component contains the set of temporary harmonics in the frequency range from 10 Hz to 700 Hz. Comparison of results takes place with the case under the assumption of the sinusoidal supply voltages with preservation of their asymmetry. The results indicate that the main contribution to the formation of the torque ripples makes the unbalance of the voltages. Consideration of non-sinusoidal voltage worsens the situation: increases the ratio of torque ripples, but not dramatically, most of the harmonics remain on the same frequencies. That is, from the point of view of the influence of the dynamic torque ripple, which cause cyclic alternating load, leading to fatigue failure of the metal bearings of induction motor, the main reason is the unbalance of supply voltages, and secondly their non-sinusoidal form.

УДК 621.4(075.8)

Оценка качества процессов впуска и сжатия бензинового и дизельного двигателей автомобиля

Витковский С.Л.

Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия
vitsl@mail.ru

Ключевые слова: рабочий процесс двигателя, тепловой баланс, коэффициент полезного действия, эффективность процессов впуска и сжатия

Распределение теплоты, вводимой при сгорании топлива, характеризует поршневой двигатель как тепловой двигатель. В данной статье рассмотрены возможности повышения мощности и коэффициента полезного действия за счёт улучшения значений параметров от фактически используемых значений до возможных. Большой эффект даёт увеличение степени сжатия (увеличение КПД на 10,8%) и приближение коэффициента избытка воздуха к значению единица (увеличение КПД на 30,7%). Соответственно увеличивается мощность (на 8,2% и 3,6%). Снижение давления и температуры в конце процесса выпуска до предельных значений, характерных для данного типа двигателя, не приводит к заметному результату. Что касается дизельного двигателя, существенный эффект даёт также повышение степени сжатия (увеличение КПД на 5,7%) и снижение коэффициента избытка воздуха до значения 1,3 (увеличение мощности на 22%). Изучено влияние степени повышения давления показателя политропы компрессора. Полученные количественные результаты соответствуют изменению лишь одного параметра при прочих неизменных исходных данных. Расчёты проведены в соответствии с принятой методикой.

Расчёт рабочих процессов поршневого двигателя внутреннего сгорания хорошо изучен [1,2], а конструкторы двигателей постоянно совершенствуют их с целью повышения параметров качества, экологичности, конкурентоспособности по сравнению с другими видами двигателей. Прогресс в организации рабочих процессов и конструкции систем двигателей обеспечивается использованием компьютерной техники. Отдельное внимание уделяется повышению надёжности поршневого двигателя автомобиля.

Двигатель внутреннего сгорания, являясь тепловым двигателем, характеризуется распределением теплоты, вводимой при сжигании топлива, на полезно-используемую и отдельные виды потерь. Повышение доли полезной теплоты приводит к повышению мощности двигателя, а снижение потерь – к повышению коэффициента полезного действия. В данной работе предлагается в процессе проведения теплового расчёта двигателя определить, какие резервы имеет улучшение параметров процессов сжатия и впуска от фактически реализуемых до «теоретически» возможных, недостигнутых, но являющихся целью на данном этапе проектирования двигателей. Оценивать количественно эти резервы следует двумя показателями: изменением мощности и коэффициента полезного действия (КПД).

Расчёты проведены для двигателя ВАЗ-2106 в среде проектирования MathCAD в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Параметры номинального режима двигателя соответствуют его краткой технической характеристике: номинальная мощность N_e = 55,5 кВт, при частоте 5400 об/мин, рабочий объём 1,57 дм^3, диаметр цилиндра 79 мм, ход поршня 80 мм, степень сжатия ε = 8,5 [4]. Следующие параметры, определяющие процесс впуска и сжатия, выбраны так, чтобы соответствовать технической характеристике:

$\alpha_в$ = 0,81 – коэффициент избытка воздуха,

η_v = 0,77 – коэффициент наполнения,

$P_г$ = 0,11 МПа – давление в конце процесса выпуска,

$T_г$ = 1000 К – температура в конце процесса выпуска.

Для бензиновых двигателей по статистическим данным эти параметры находятся в следующих пределах: ε = 6…12, $\alpha_в$ = 0,95…0,98, η_v = 0,70…0,90, $P_г$ = 0,105…0,20 МПа, $T_г$ = 900…1100 К.

Результаты расчёта представлены в таблице 1. Строка 1 соответствует вышеперечисленным исходным параметрам. Из таблицы видно, что повышение степени сжатия до 11 приводит при прочих неизменных исходных данных к повышению мощности на 8,2% и КПД на 10,8%. Повышение ε свыше 12 не практикуется ввиду возникновения детонационного сгорания смеси и самовоспламенения. Для современных двигателей с впрыском лёгкого топлива во впускной тракт и электронным управлением достигаются значения ε =13, что определяет полезность увеличения этого параметра.

Таблица 1

Сравнение результатов эффективности изменения параметра карбюраторного двигателя

№ п/п	η	Δη	*Ne*, кВт	Δ *Ne*	ε	$\alpha_в$	η_v	$P_г$, МПа	$T_г$, К
1	0,231	–	55,5	–	8,5	0,81	0,77	0,11	1000
2	0,256	10,8%	60,1	8,2%	11				
3	0,302	30,7%	57,5	3,6%		1			
4	0,240	3,9%	65,8	18,6%			0,9		
5	0,231	–	55,5	–				0,105	
6	0,231	–	55,6	0,2%					900

Большой эффект даёт увеличение коэффициента избытка воздуха до значения 1. Такая смесь, называемая нормальной, сбалансирована по составу топлива и воздуха, содержащего кислород. Использование в двигателе ВАЗ-2106 $\alpha_в = 0,85$ означает нехватку кислорода примерно на 15% и вызвано несовершенством работы карбюратора. Этот прирост $\alpha_в$ приводит при прочих неизменных исходных данных к повышению мощности на 3,6% и КПД на 30,7%. В современных двигателях на средних и номинальных режимах реализуют коэффициент избытка воздуха чуть меньший единицы ($\alpha_в = 0,98$), что необходимо для снижения содержания токсичных компонентов в отработавших газах двигателя.

Коэффициент наполнения определяет степень массового наполнения надпоршневого пространства горючей смесью и его повышение до значения один достигается различными конструктивными средствами. Среди них снижение газодинамического сопротивления впускного тракта, применения трёх или четырёх клапанов на цилиндр. Однако достижение предельного значения невозможно в связи с конечно малой вязкостью свежего заряда. Оно объективно снижается при увеличении скорости свежего заряда с увеличением частоты вращения коленчатого вала, последнее, определяется тенденцией повышения мощности двигателя. Повышение коэффициента наполнения до 0,9 приводит при прочих неизменных исходных данных к повышению мощности на 18,6% и КПД на 3,9%.

Снижение давления $P_г$ и температуры $T_г$ в конце процесса выпуска до предельных значений, характерных для данного типа двигателя, не приводит к заметному результату по мощности и КПД, однако, принципиально, улучшает качество двигателя.

Анализ влияния изменения параметров для дизельного двигателя проведён на примере двигателя с наддувом КамАЗ 740.13-260. Параметры номинального режима двигателя соответствуют его краткой технической характеристике: номинальная мощность $N_e = 191$ кВт, при частоте 2600 об/мин, рабочий объём 10,85 дм^3, диаметр цилиндра 120 мм, ход поршня 120 мм, степень сжатия ε = 16 [4]. Следующие параметры, определяющие процесс впуска и сжатия, выбраны так, чтобы соответствовать технической характеристике:

$\alpha_в = 1,6$ – коэффициент избытка воздуха,

$\eta_v = 0,9$ – коэффициент наполнения,

$n_k = 1,65$ – показатель политропы сжатия компрессора,

$\lambda = 1,9$ – степень повышения давления.

Для дизельных двигателей с наддувом по статистическим данным эти параметры находятся в следующих пределах: ε = 15…19, $\alpha_в$ = 1,3…2,2, η_v = 0,9…0,95, $n_к$ = 1,4…2, λ = 1,5…1,8.

Таблица 2

Сравнение результатов эффективности изменения параметра дизельного двигателя

№ п/п	η	Δη	*Ne*, кВт	Δ *Ne*	ε	$\alpha_в$	η_v	$n_к$	λ
1	0,366	–	191	–	16	1,6	0,9	1,65	1,9
2	0,387	5,7%	201,8	5,2%	19				
3	0,367	0,3%	233	22%		1,3			
4	0,371	1,4%	204,5	7%			0,95		
5	0,366	–	196,2	2,7%				1,4	
6	0,369	0,8%	193,4	1,2%					2

Результаты расчёта представлены в таблице 2. Строка 1 соответствует вышеперечисленным исходным параметрам. Из таблицы видно, что повышение степени сжатия до 19 приводит при прочих неизменных исходных данных к повышению мощности на 5,2% и КПД на 5,7%. Дальнейшее повышение ε приводит к выходу за предельные возможности эксплуатационных материалов по максимальному давлению и температуре.

Коэффициента избытка воздуха следует приближать к единице. Снижение $\alpha_в$ до 1, 3 (максимально возможное значение для дизельных двигателей) приводит к повышению мощности на 22%, а КПД практически не изменяется.

Вместо давления $P_г$ и температуры $T_г$ в конце процесса выпуска для дизеля интересно установить влияние n_k показателя политропы сжатия компрессора и λ показателя политропы сжатия. Их влияние на КПД мало. Некоторый прирост мощности даёт уменьшение n_k, так как это определяет меньший нагрев свежего заряда в компрессоре и увеличивает массовое наполнение надпоршневого пространства. Прирост мощности в 7% происходит в результате повышения коэффициента наполнения от 0,9 до 0,95.

Исследованию повышения качества бензиновых и дизельных двигателей посвящен ряд работ, в том числе и автора этой статьи [5,6,7].

Материал данной работы позволяет сделать следующие выводы:

1) оценка улучшения параметров процессов впуска и сжатия двигателя может быть осуществлена изменением его мощности и коэффициента полезного действия, при прочих неизменных исходных данных;

2) на примере рассмотренного двигателя видно, что наиболее значительные приросты определяются коэффициентом избытка воздуха и степенью сжатия. Практически не оказывают влияние температура и давление в конце процесса расширения.

Литература:

1. Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов. Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высшая школа, 2007. – 479 с.: ил.

2. Шатров М.Г., Морозов К.А., Алексеев И.В. и др. Автомобильные двигатели: Учебник для студ. высш. учеб. заведений; под ред. М.Г. Шатрова. 2-ое изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 464 с.

3. Колчин А.И. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов – 3-е изд. перераб. и доп.–М.: Высш. шк., 2002.– 496 с.: ил.

4. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Понизовкин, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов и др. – М.: АО «Трансколсантинг», НИИАТ, 1994. – 779 с.

5. Витковский С.Л., Разумов Ю.А. Диагностика системы питания двигателя с использованием кривой разгона на холостом ходу / Механики XXI веку. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 266 с. С. 200–204.

6. Витковский С.Л., Илларионов А.П. Коэффициент снижения мощности на холостом ходу / Труды Братского государственного университета: Сер.: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири: в 2 т. – Братск: Изд-во БрГУ, 2011.–Т.2.–252 с. С. 70–75.

7. Витковский С.Л. Тепловая напряжённость поршня двигателя внутреннего сгорания с турбонаддувом // Современная наука: теоретический и практический взгляд: сборник статей Международной научно-практической конференции (28 ноября 2015 г., г. Челябинск) В 3 ч. Ч.2 – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. 270 с. С. 15–19.

Intake and compression efficiency evaluation off petrol and diesel automobile engines

Vitkovsky S.L.

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
vitsl@mail.ru

Keywords: engine operation, heat balance, efficiency, intake and compression efficiency

Reciprocating engine is thermal engine that transform heat from fuel combustion. The questions of power and efficiency increasing potentialities at the expense of value parameter optimization from real to possible are shown. Grate effect gives increasing of compression ratio (efficiency increase is 10.8%) and approach of excess air ratio to unit (efficiency increase is 30.7%). Power increasing also (8.2% and 3.6%). Fall in temperature and pressure in the end of exhaust to maximum value that characterize our engine class have now a little result. As to diesel automobile engines grate effect gives increasing of compression ratio too (efficiency increase is 5.7%) and approach of excess air ratio to unit (power increase is 22%). It is camed to understand the impact of pressure ratio and air compressors polytrope ratio. These quality results are received by changing only one parameter. The rest was constant. Design procedure is well-known.

УДК 629.114.2:629.11.013

Исследования влияния плотности разрабатываемого грунта на эксплуатационную нагруженность трансмиссий трактора

Стручков А.В.[1,a], Климов А.А.[2,b], Ереско Т.Т.[1,c]

[1]Сибирский государственный аэрокосмический университет им. ак. М.Ф. Решетнева, пр. Газеты «Красноярский рабочий» д. 31, Красноярск, Россия
[2] Красноярский институт железнодорожного транспорта филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, ул. Л. Кецховели, д. 89, Красноярск, Россия
[a]str-alex-v@mail.ru, [b]anatoly.klimoff2013@yandex.ru, [c]ereskottt@mail.ru

Ключевые слова: плотность разрабатываемого грунта, нагруженность, энергонасыщенность, механическая и гидромеханическая трансмиссии, бульдозирование

В статье приведены методика и анализ результатов экспериментальных исследований проведенных на промышленном тракторе с энергонасыщенностью 14,8 кВт/т с механической и гидромеханической трансмисиями с целью получения количественной оценки влияния плотности грунта на динамическую нагруженность трансмиссии трактора. Показаны графические зависимости полученных в результате экспериментальных исследований параметров: изменения крюковых усилий, крутящих моментов двигателя (МТ) и турбины ГТР (ГМТ) и коэффициента загрузки двигателя трактора от плотности грунта для механической (МТ) и гидромеханической (ГМТ) трансмиссий на режимах резания и транспортирования грунтов. Полученные количественные оценки нагруженности трансмиссии трактора показывают, что плотность разрабатываемого бульдозером грунта оказывает существенное влияние на структуру процессов нагружения, вызывает изменение статической составляющей и увеличение динамической составляющей эксплуатационной нагруженности на основных операциях бульдозирования.

Введение. Эффективность бульдозерно-рыхлительного агрегата в значительной степени определяется тягово-динамическими показателями базового трактора. Научный и практический интерес представляет изучение тяговой динамики агрегатов при характерных режимах эксплуатации и принятой в практике технологии работ [1,2,3,4,5,6]. Тягово-

экономические показатели работы бульдозерного агрегата в значительной степени определяет плотность разрабатываемого грунта при выполнении бульдозерных работ. Для количественной оценки влияния плотности грунта на тяговую динамику и динамическую нагруженность механической и гидромеханической трансмиссий были проведены экспериментальные исследования на тракторе с энергонасыщенностью 14,8 кВт/т на грунтах с различной плотностью [7,8].

Методика экспериментальных исследований. Подготовленный, оборудованный датчиками и регистрирующей аппаратурой экспериментальный трактор-бульдозер был испытан на землеройных работах при разработке стандартных траншей на грунтах 1-4 категорий [9,10]. В процессе экспериментальных исследований периодически, отдельно для каждой серии опытов, определялись характеристики разрабатываемого грунта по таким показателям, как плотность, влажность, объемный вес.

Количество проб при определении плотности, влажности и объемного веса грунта на каждом из участков равнялось пяти. Пробы брались равномерно на глубине разрабатываемых траншей. Взятые пробы регистрировались соответствующими номерами экспериментов. Плотность грунта измерялась плотномером ДОРНИИ. По результатам замеров определялись пределы и средние значения плотности в ударах плотномера [7,9].

Результаты. В процессе экспериментальных исследований бульдозерного агрегата решался большой комплекс задач по тяговой динамике трактора и динамической нагруженности трансмиссии. В результате были получены осциллограммы силовых параметров нагруженности трансмиссий – крюковых усилий и крутящих моментов двигателя (МТ) и турбины ГТР (ГМТ) на режимах резания и транспортирования грунтов на третьей передаче, обеспечивающей максимальную производительность. Полученные осциллограммы обработаны с использованием аппарата математической статистики двумя методами – ординатным методом и метолом экстремумов. Анализ статистических показателей процесса нагружения [7,9,10] позволяет установить влияние плотности разрабатываемого грунта на силовые параметры в механической и гидромеханической трансмиссиях трактора. Как видно из приведенных данных (табл. 1) среднестатические значения силовых параметров с увеличением плотности грунта до 11-14 ударов плотномера ДОРНИИ растут, обеспечивая повышение тягово-динамических характеристик процесса бульдозирования. При дальнейшем увеличении плотности грунта эти характеристики уменьшаются (рис. 1, 2).

Таблица 1

Математические ожидания силовых параметров нагруженности трансмиссии трактора при выполнении бульдозерных работ на грунтах различной плотности

Силовые параметры	Тип трансмиссии	Режим работы	Плотность грунта, ударов плотномера ДОРНИИ			
			3-7	8-15	15-20	20-26
Крюковое усилие $P_{кр}$, кН	МТ	Транспортирование грунта	67,1	72,2	69,0	60,8
		Резание и набор грунта	72,8	85,82	73,6	65,24
	ГМТ	Транспортирование грунта	69,5	76,9	77,9	69,5
		Резание и набор грунта	76,2	92,72	89,9	77,1
Крутящий момент двигателя $M_{дв}$, турбины $M_т$, Н·м	МТ	Транспортирование грунта	450	491	478	417
		Резание и набор грунта	584	661,2	630	525
	ГМТ	Транспортирование грунта	467	518	540	471
		Резание и набор грунта	636	720	614	538
Крутящий момент средний по полуосям $M_п$, Н·м	МТ	Транспортирование грунта	3250	3550	3480	3120
		Резание и набор грунта	4380	5300	4730	3490
	ГМТ	Транспортирование грунта	3350	3750	3.950	3556
		Резание и набор грунта	4580	5820	5390	4600

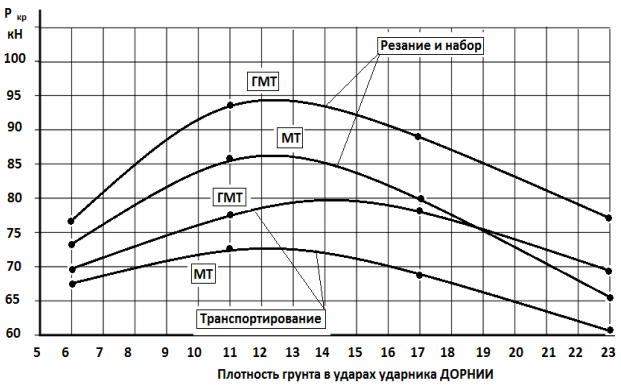


Рис. 1. Графики изменения крюковых усилий в зависимости от плотности грунта для третьей передачи МТ и ГМТ на режимах резания и транспортирования грунтов

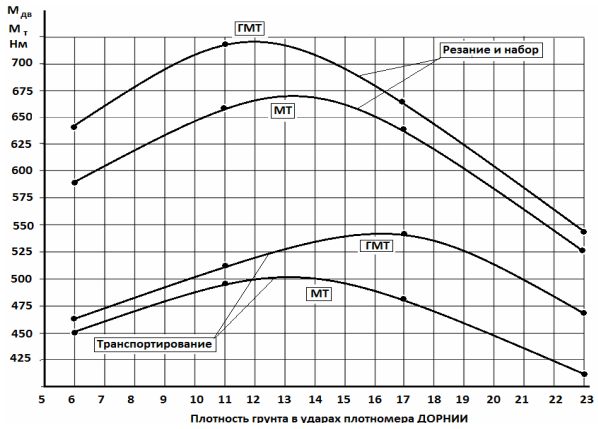


Рис. 2. Графики изменения крутящих моментов двигателя (МТ) и турбины ГТР (ГМТ) в зависимости от плотности грунта для третьей передачи МТ и ГМТ на режимах резания и транспортирования грунтов

Силовые параметры при бульдозировании на грунтах первой категории выше, чем на грунтах четвертой категории. Повышение нагруженности с повышением плотности грунта до 11-13 ед. ДОРНИИ объясняется изменением физико-механических свойств. Так, с увеличением плотности возрастает усилие на дорезание грунта в процессе транспортирования и усилие на перемещение грунта в траншее, т.к. на более плотных грунтах объем призмы грунта перед отвалом бульдозера увеличивается вследствие меньшей рыхлости и меньших потерь в процессе перемещения.

Дальнейшее снижение силовых параметров объясняется интенсивным буксованием движителя, вследствие неполного внедрения грунтозацепов в грунт, что определяет неполный забор грунта.

Для гидромеханической трансмиссии трактора при разных режимах работы, рассматриваемые силовые параметры выше, чем в механической трансмиссии в среднем на 9% на полуосях заднего моста (по категориям грунтов соответственно 3,6,13 и 14%) и на 10,6% в среднем по крюковому усилию. Это объясняется более плавным приложением крутящего момента на турбине гидротрансформатора и связанным с этим улучшением динамики буксования.

При резании и наборе грунтов средние значения крутящих моментов на валах заднего моста трактора в среднем в 1,36 раза выше, чем при транспортировании. Повышение плотности грунта приводит к заметному снижению этой тенденции, что связано с особенностями приемов управления в наборе грунта и взаимодействия движителя с грунтом, что приводит к снижению объема призмы при движении. Положительные свойства ГТР в трансмиссии при разработке грунтов высокой плотности проявляются в более значительной степени, чем при разработке мягких грунтов.

Анализ эксплуатационной загрузки двигателя при выполнении бульдозерных работ показывает (таблица 2), что этот показатель варьирует в существенных пределах в зависимости от плотности разрабатываемого грунта (рис. 3).

Из рисунка 3 видно, что при бульдозировании грунтов 1 категории (5-7 ударов плотномера) трактор работает с недогрузкой, как на режиме резания, так и на режиме транспортирования грунтов. При разработке грунтов 2 категории коэффициент загрузки двигателя достигает максимальных значений 0,71 и 0,83 для трактора с МТ, 0,75 и 0,87 для трактора с ГМТ на второй и третьей передачах соответственно.

При резании грунта второй категории на второй передаче двигатель работает в номинальном режиме, уходя в перегрузку на третьей передаче. В дальнейшем, с ростом плотности грунта, коэффициент эксплуатационной загрузки двигателя уменьшается, исключая режим

транспортирования грунта для трактора с ГМТ. При этом загрузка трактора с ГМТ выше, чем трактора с МТ в среднем на 8%.

Таблица 2

Коэффициенты эксплуатационной загрузки двигателя трактора при выполнении бульдозерных работ на грунтах различной плотности

Тип трансмиссии	Передача	Режим работы	Плотность грунта в ударах плотномера ДОРНИИ			
			5-7	8-15	15-20	20-26
МТ	2	Резание	0,79	1,01	0,85	0,71
		Транспортирование	0,64	0,71	0,66	0,57
	3	Резание	0,96	1,12	1,05	0,88
		Транспортирование	0,76	0,83	0,81	0,71
ГМТ	2	Резание	0,91	1,03	0,95	0,77
		Транспортирование	0,65	0,75	0,75	0,64
	3	Резание	1,07	1,22	1,04	0,91
		Транспортирование	0,79	0,87	0,91	0,79

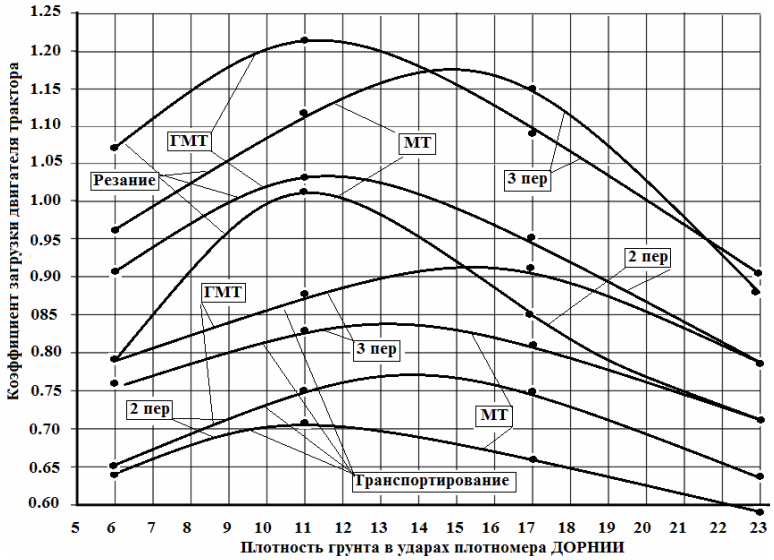


Рис. 3. Изменение коэффициента загрузки двигателя трактора от плотности разрабатываемого грунта

Таблица 3

Коэффициенты вариации силовых параметров трактора в среднем по основным рабочим передачам

Силовые параметры	Тип трансмиссии	Режим работы	Плотность грунта, ударов плотномера ДОРНИИ			
			3-7	8-15	15-20	20-26
Крюковое усилие $P_{кр}$, кН	МТ	Транспортирование грунта	0,052	0,076	0,105	0,156
		Резание и набор грунта	0,07	0,10	0,14	0,2
	ГМТ	Транспортирование грунта	0,052	0,07	0,08	0,14
		Резание и набор грунта	0,07	0,09	0,12	0,18
Крутящий момент двигателя $M_{дв}$, турбины $M_т$, Н·м	МТ	Транспортирование грунта	0,077	0,111	0,165	0,218
		Резание и набор грунта	0,095	0,127	0,10	0,289
	ГМТ	Транспортирование грунта	0,071	0,101	0,145	0,284
		Резание и набор грунта	0.88	0,115	0,153	0,221
Крутящий момент средний по полуосям $M_п$, Н·м	МТ	Транспортирование грунта	0,096	0,14	0,212	0,278
		Резание и набор грунта	0,12	0,16	0,25	0,36
	ГМТ	Транспортирование грунта	0,089	0,127	0,182	0,228
		Резание и набор грунта	0,11	0,144	0,197	0,284

Изменение загрузки двигателя при разработке грунтов различной плотности объясняется динамикой буксования движителя. Наилучшими сцепными свойствами обладает на грунтах второй категории и наихудшими – на грунтах четвертой категории. Следует отметить, что при всех равных условиях буксование трактора с ГМТ на 6…11% ниже, чем трактора с МТ.

С повышением плотности грунта коэффициенты вариации силовых параметров трактора по основным рабочим передачам, характеризующие относительную оценку меры разбросанности значений, возрастают как в МТ, так и в ГМТ. При транспортировании грунта коэффициенты вариации имеют меньшие значения, чем при резании и наборе грунта (табл. 3). Коэффициенты вариации силовых параметров в ГМТ при транспортировании грунта в среднем на 13,7% меньше, чем в МТ (по грунтам соответственно на 8, 10, 15, 22%). При резании и наборе грунта коэффициенты вариации на ГМТ на 17,2% ниже, чем в МТ (по категориям грунтов соответственно на 9, 11, 22, 26,7%).

Выводы. Таким образом, определенные в статистическом аспекте количественные оценки нагруженности трансмиссии трактора показывают, что плотность разрабатываемого бульдозером грунта оказывает существенное влияние на структуру процессов нагружения элементов трансмиссии трактора, вызывает изменение статической составляющей и увеличение динамической составляющей эксплуатационной нагруженности на основных операциях бульдозирования.

Статическая нагруженность гидромеханической трансмиссии в среднем по грунтам на 12…15% выше, чем в механической трансмиссии, на 8% выше загруженность двигателя, на 10…27% ниже динамическая составляющая при снижении буксования на 6..11%.

Литература:

1. Упиров П.П., Климов А.А., Емелин В.И., Желукевич Р.Б. Исследование тягово-динамических свойств гусеничного рыхлителя с навесным уширительным оборудованием. Механизация строительства в районах восточной Сибири и крайнего севера: Сб. статей / красноярский Промстройниипроект. – Красноярск. 1983.- 96 с.

2. Упиров П.П. Совершенствование методов оценки нагруженности и долговечности деталей на примере механической и гидромеханической трансмиссий промышленной модификации гусеничного сельскохозяйственного трактора: автореф. дисс. … канд. техн. наук. Красноярск, 1977.

3. Сафронов В.П., Сафронов В.В., Сидорков А.А. Способ повышения производительности бульдозерно-рыхлительного агрегата / Известия ТулГУ. Науки о земле. Вып. 1. – Тула. 2012. С. 127-135.

4. Шеховцов В.В. Анализ и синтез динамических характеристик автотракторных силовых передач и средств для их испытания. Монография.– Волгоград, изд-во РПК «Политехник», 2004.

5. Шеховцов В.В. Снижение нагруженности трансмиссии трактора ВТ-100 от воздействия гусеничного движителя / В.В. Шеховцов., В.П. Шевчук, С.В. Зленко, И.А. Долгов, В.В. Косенко, А.О. Куликов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 2. – С. 27–29.

6. Shalfer P.M., Winter I.A. Hidraulic torgue converter, its. Effect on the power train. / Shalfer P.M., Winter I.A. // "SAE", "Transactions", vol. 61. 1983.

7. Климов А.А., Стручков А.В. Формирование нагрузочных режимов в трансмиссии промышленного трактора / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 168 с.

8. Стручков, А.В. Исследование и совершенствование элементов гидромеханической трансмиссии гусеничного бульдозера: дис. … канд. техн. наук. – Красноярск: 2009. – 179 с.

9. Климов А.А., Стручков А.В. Исследование динамической нагруженности трансмиссии бульдозерного агрегата на базе трактора класса 40 кН на грунтах 1-2 категорий. / Вестник КрасГАУ. №1.-Красноярск.2008.- с. 201- 206.

10. Стручков А.В., Климов А.А., Ереско Т.Т. Результаты экспериментальных исследований трансмиссии бульдозера на базе трактора ТП-4. / Системы. Методы. Технологии: Научный периодический журнал/ ГОУ ВПО «БрГУ». Братск, 2009, №4. С.34-37.

Study of the influence of the density of the ground being prepared for operational response tractor transmissions

Struchkov A.V.[1,a], Klimov A.A.[2,b], Eresko T.T.[1,c]

[1]Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev; 31, Krasnoyarskiy Rabochiy Ave., Krasnoyarsk, Russia
[2]Krasnoyarsk Stat Transport University; 89, Lado Ketshoveli St., Krasnoyarsk, Russia
[a]str-alex-v@mail.ru, [b]anatoly.klimoff2013@yandex.ru, [c]ereskottt@mail.ru

Keywords: density of the developed soil, cistern, energy content, mechanical and hydromechanical transmission, bul'dozirovanie

This article discusses the methodology and analysis of the results of the pilot studies carried out on industrial tractor with a concentration of energy 14.8 kW/t with mechanical and hydromechanical transmisijami with a view to obtaining a quantitative assessment of the impact of soil density on the dynamic response of the transmission of the tractor. Showing graphic dependences obtained through experimental research settings: change hook efforts torques (MT) engine and turbine torque converter (HMT) and loading factors tractor engine from soil density (MT) for mechanical and hydromechanical (HMT) transmissions on cutting and transportation modes. The obtained quantitative estimates of load transmission of the tractor show that the density of the developed soil the bulldozer has a significant impact on the structure of the loading process, causes a change of the static and dynamic component of the increase of the operational load on major operations of bulldozing work. The obtained quantitative estimates of load transmission of the tractor show that the density of the developed soil the bulldozer has a significant impact on the structure of the loading process, causes a change of the static and dynamic component of the increase of the operational load on major operations of bul'dozirovanija.

УДК 159.9:629

Результаты внедрения новых примерных программ профессиональной подготовки водителей транспортных средств в Российской Федерации

Ясенков Е.П.[a], Парфенова Л.А.

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]bravo-bratsk@yandex.ru

Ключевые слова: Профессиональная подготовка водителей транспортных средств, дорожно-транспортные происшествия, статистика ДТП, причины дорожно-транспортных происшествий, рост количества автомобилей на дорогах, уровень подготовки курсантов в автошколах

В Российской Федерации введены в действие 28 Примерных программ профессиональной подготовки водителей транспортных средств с новыми категориями и подкатегориями. Статистика ГИБДД за 2015 и 2016 годы отмечает снижение аварийности практически по всем параметрам. Главными факторами при совершении большого количества ДТП и их последствий в РФ являются неудовлетворительное состояние улично-дорожной сети, нарушение ПДД, рост количества автотранспорта, недостаточный уровень подготовки курсантов в автошколах. Проведенные исследования показали, что автошколы Российской Федерации могут достаточно эффективно осуществлять подготовку, переподготовку и повышение квалификации водителей транспортных средств на основании новых Примерных программ.

В целях реализации Федерального закона № 196-ФЗ [1] «О безопасности дорожного движения» в 2014 году вступил в силу Приказ Минобрнауки РФ № 1408 [2], согласно которому утверждены 28 примерных программ профессионального обучения водителей транспортных средств (ТС) соответствующих категорий и подкатегорий.

При этом утратили силу Приказ Минобрнауки РФ № 636 [3], Федеральный закон РФ № 92-ФЗ [4] и Кодекс Российской Федерации «Об административных правонарушениях» [5], которые включали соответственно пять и шестнадцать типов примерных программ подготовки водителей ТС.

Видимо, разработчики предположили, что большее количество новых примерных программ приведет к существенному качественному улучшению подготовки водителей. Через 2 года после внедрения этих программ попытаемся проанализировать их эффективность. В основу исследования положим данные из различных статистических источников.

Государственная инспекция безопасности дорожного движения (ГИБДД) обнародовала статистику дорожно-транспортных происшествий (ДТП) в Российской Федерации (РФ) за 2015 и 2016 гг. [6, 7].

Статистика дорожно-транспортных происшествий в Российской Федерации за 2015 и 2016 гг. представлена в табл. 1.

Таблица 1

Статистика дорожно-транспортных происшествий
в Российской Федерации за 2015 и 2016 гг.

Год	Количество ДТП, шт.	± % АППГ	Погибло, чел.	± % АППГ	Ранено, чел.	± % АППГ
2015	184000	-8,2	23114	-14,7	231197	-8,6
2016	173694	-5,6	20308	-12,1	221140	-4,3

Из табл. 1 видно, что за последние 2 года наблюдается стабильный процент снижения (± % АППГ – к аналогичному периоду прошлого года) всех основных показателей безопасности дорожного движения (БДД). Главным является то, что удалось сократить число погибших в ДТП: в 2015 г. – на 14,7%; в 2016 г. – на 12,1%.

В работе [8] говорится, что главными факторами при совершении большого количества дорожно-транспортных происшествий и их последствий в Российской Федерации являются: 1) неудовлетворительные условия содержания и обустройства улично-дорожной сети; 2) нарушение правил дорожного движения водителями транспортных средств; 3) рост количества автомобилей на дорогах РФ; 4) недостаточный уровень подготовки курсантов в автошколах. Целью данного исследования являются все пункты указанной проблемы.

Основные виды ДТП в РФ за 2016 г. [7] показаны в табл. 2.

Таблица 2

Основные виды ДТП в РФ за 2016 г.

Виды ДТП	Количество ДТП, шт.	± % АППГ	Погибло, чел.	± % АППГ	Ранено, чел.	± % АППГ
Всего, в т.ч.:	173694	-5,6	20308	-12,1	221140	-4,3
столкновения ТС	72605	-3,5	8662	-8,3	111843	-2,5
наезд на пешехода	52018	-8,6	5806	-17,3	49040	-7,6
опрокидывания ТС	14103	-13,7	2234	-19,5	18241	-12,9

Анализируя табл. 2, можно сделать следующие выводы.

1. В 2016 г. в РФ на основные виды дорожно-транспортных происшествий приходилось 138727 происшествий (79,8%) от общего числа ДТП.

2. Основными видами ДТП являлись: 1) столкновения ТС – 72605 штук (41,8%); 2) наезд на пешехода – 52018 штук (29,9%); 3) опрокидывания ТС – 14103 штук (8,1%).

Как и прежде, одной из самых частых причин совершения ДТП являются неудовлетворительные условия содержания и обустройства улично-дорожной сети (НДУ) [7, 8] – табл. 3.

Таблица 3

Количество ДТП из-за неудовлетворительных условий содержания и обустройства улично-дорожной сети (НДУ) за 2016 г.

Виды НДУ	Количество ДТП, шт.	± % АППГ	Погибло, чел.	± % АППГ	Ранено, чел.	± % АППГ
Всего, в т.ч.:	71550	+13,4	7845	-2,1	91208	+15,2
в городах и населенных пунктах	59875	+19,7	4641	+12,8	73766	+22,6
на автомобильных дорогах общего пользования	17275	+4,5	4472	-2,7	24758	+6,5
на пешеходных переходах	14915	+19,0	840	+8,1	15861	+21,7

Из табл. 3 видим следующее:

1. За 2016 г. из-за неудовлетворительных условий содержания и обустройства улично-дорожной сети произошло 71550 происшествий (+13,4%) от общего числа ДТП.

2. Рост количества ДТП из-за неудовлетворительных условий содержания и обустройства улично-дорожной сети наблюдался: 1) в городах и населенных пунктах – 59875 штук (+19,7%); 2) на автомобильных дорогах общего пользования – 17275 штук (+4,5%): 3) на пешеходных переходах – 14915 штук (+19,0%).

Второй по частоте совершения причиной ДТП является нарушение правил дорожного движения (ПДД) водителями транспортных средств [8, 9]. Количество нарушителей правил дорожного движения и эксплуатации транспортных средств приведены в табл. 4.

Таблица 4

Количество нарушителей правил дорожного движения и эксплуатации транспортных средств за 2015 г.

Виды нарушителей ПДД,	Количество нарушителей ПДД, всего, чел.	% от количества нарушителей ПДД, всего	Количество водителей-нарушителей ПДД, управлявших ТС физических лиц, чел.	% от количества водителей-нарушителей ПДД, всего	Количество водителей-нарушителей ПДД, не имевших права управления, чел.	% от количества водителей-нарушителей ПДД, всего
в т.ч.:	29596376	100	–	–	–	–
водители, в т.ч.:	26642726	90,0	24814221	93,1	354658	1,33
- легковых а/м	22890050	77,3	21840083	81,9	329834	1,24
- грузовых а/м	2903701	9,8	2308269	8,7	20386	0,07
- автобусов	848975	2,9	665869	2,5	4438	0,02
пешеходы	2754831	9,3	–	–	–	–
пассажиры	198819	0,7	–	–	–	–

Анализируя табл. 4, можно сделать следующие выводы:

1. За 2015 г. было выявлено всего 29596376 человек (100%) нарушителей ПДД, среди которых были: 26642726 чел. (90%) – водители ТС; 2754831 чел. (9,3%) – пешеходы; 198819 чел. (0,7%) – пассажиры.

2. Из 26642726 человек (100 %) водителей – нарушителей правил дорожного движения и эксплуатации транспортных средств всего: 22890050 чел. (85,9%) – водители легковых

автомобилей; 2903701 чел. (10,9%) – водители грузовых автомобилей; 848975 чел. (3,2%) – водители автобусов.

3. Из 26642726 человек (100 %) водителей – нарушителей ПДД и эксплуатации ТС всего: 24814221 чел. (93,1%) – водители, управлявшие транспортными средствами физических лиц (частники), а 354658 чел. (1,33%) – вообще не имели права управления ТС.

Авторы работы [8] отмечают, что существенным фактором при совершении большого количества дорожно-транспортных происшествий и их последствий в России является рост количества автотранспортных на дорогах.

Динамика роста количества автотранспортных средств и прицепов к ним, стоящих на учете в ГИБДД в Российской Федерации за последние 4 года [8, 9], представлена в табл. 5.

Таблица 5

Динамика роста количества автотранспортных средств в Российской Федерации

Годы	2012	2013	2014	2015
Количество АТС и прицепов к ним всего, штук (±%)	50512132 (+5,7%)	53321510 (+5,6%)	55699737 (+4,4%)	56616354 (+1,6%)

Из табл. 5 видно, что за последние 4 года наблюдается стабильный рост количества АТС в Российской Федерации на 2,378 – 0,917 млн. единиц в год.

Авторы [8,10] утверждают также, что большое количество дорожно-транспортных происшествий и их последствий в России является следствием недостаточного уровня подготовки в автошколах, коррупционной составляющей при получении водительских удостоверений и, в первую очередь, культуры людей и собственного отношения к безопасности дорожного движения.

После утверждения и введения в действие новых примерных программ профессиональной подготовки водителей ТС соответствующих категорий и подкатегорий и необходимости получения заключения ГИБДД по учебно-материальной базе, в частности – установление минимально допустимого размера закрытой площадки (автодрома – не менее 0,24 га), количество образовательных учреждений (организаций), осуществляющих подготовку водителей транспортных средств в РФ сократилось примерно вдвое: с 8089 штук в 2014 г. [8] до 5500 штук к декабрю 2015 года.

Например, в г. Братске из 15 образовательных учреждений в 2014 году прошли проверку соответствия учебно-материальной базы, получили заключения ГИБДД и осуществляют образовательную деятельность по подготовке водителей в 2017 году – только 11 автошкол.

Как следствие, число граждан, получивших водительские удостоверения на право управления автомототранспортными средствами в автошколах страны в динамике за последние 4 года [8, 9], стало сокращаться – табл. 6.

Таблица 6

Число граждан, получивших водительские удостоверения на право управления автомототранспортными средствами в автошколах страны

Годы	2012	2013	2014	2015
Число граждан, единиц (±%)	2311618	2239794 (+3,1%)	2466207 (+10,1%)	1871928 (-24,1%)

Анализируя табл. 6, можно сделать следующие выводы.

1. В 2012 – 2014 годы наблюдался рост численности граждан, получивших водительские удостоверения на право управления автомототранспортными средствами в автошколах России на 71,8 – 226,4 тыс. человек в год.

2. После сокращения количества образовательных учреждений (организаций), осуществляющих подготовку водителей ТС в стране, число граждан, получивших водительские

удостоверения на право управления автомототранспортными средствами уменьшилось на 59,4 тыс. чел. (-24,1%) в 2015 году по сравнению с 2014 годом.

В работе [8] говорилось, что сразу после внедрения новых примерных программ за 6 месяцев 2015 г. меньше всего дорожно-транспортных происшествий совершили водители со стажем управления от 3 до 5 лет – 10,1% (6452 случаев ДТП).

Немногим более дорожных аварий приходилось на недавних выпускников образовательных учреждениях (организациях) со стажем управления до 3 лет – 12,9% (8221 случаев ДТП).

Водители со стажем управления от 5 до 10 лет совершали почти в 2 раза больше ДТП, чем водители в двух предыдущих группах – 23,2% (6452 случаев ДТП).

Особую опасность на дорогах создавали водители со стажем управления свыше 15 лет – 39,4% (25053 случаев ДТП).

Представляется целесообразным рассмотреть аналогичную статистику за более поздний период.

Статистика дорожно-транспортных происшествий и пострадавших из-за нарушения правил дорожного движения водителями транспортных средств за 2016 г. [7] приведена в табл. 7.

Таблица 7

Статистика дорожно-транспортных происшествий и пострадавших из-за нарушения правил дорожного движения водителями ТС за январь – декабрь 2016 г.

Наименование показателя	Российская Федерация					
	ДТП, штук (%)	± % АППГ	погибло	± % АППГ	ранено	± % АППГ
ДТП и пострадавшие из-за нарушения ПДД водителями транспортных средств, всего	150860	-4,5	16933	-10,9	200622	-3,5
Из них, водителями со стажем управления:	144514 (100)	-	-	-	-	-
до 2 лет	11960 (8,2)	-17,4	1154	-25,1	16953	-16,1
от 2 до 5 лет	21013 (14,5)	-7,0	2082	-15,5	29057	-6,7
от 5 до 10 лет	33370 (23,1)	-1,7	3483	-9,5	45332	-0,7
от 10 до 15 лет	20019 (13,9)	-3,5	2358	-9,0	26838	-2,5
свыше 15 лет	58152 (40,3)	-2,2	7608	-8,4	77059	-0,7

Из табл. 7 видно следующее:

1. В 2016 году наблюдался стабильный процент снижения (± % АППГ – к аналогичному периоду прошлого года): количество дорожно-транспортных происшествий из-за нарушения правил дорожного движения водителями ТС – на 4,5%; число погибших в ДТП сократилось – на 10,9%; количество пострадавших – на 3,5% по сравнению с 2015 годом.

2. За 2016 год меньше всего дорожно-транспортных происшествий совершили водители – недавние выпускники образовательных учреждениях (организациях) со стажем управления до 2 лет – 8,2% (11960 случаев ДТП). Это свидетельствует о существенном росте уровня подготовки водителей ТС в автошколах, по сравнению с 2014 годом.

3. Водители со стажем управления от 2 до 5 лет и от 5 до 10 лет совершили почти в 2 раза больше ДТП, чем водители-новички, соответственно 14,5% (21013 случаев ДТП) и 13,9% (20019 случаев ДТП).

4. Особую опасность на дорогах создавали водители со стажем управления свыше 15 лет – 40,3% (58152 случаев ДТП). Это может свидетельствовать об их умышленном совершении грубых нарушений правил дорожного движения, в частности – выезде во время обгона на полосу встречного движения, где происходило лобовое столкновение со встречным транспортным средством.

Выводы:

1. После введения в действие в 2014 г. новых примерных программ профессиональной подготовки водителей ТС соответствующих категорий и подкатегорий и ужесточения требований ГИБДД к учебно-материальной базе образовательных учреждений, количество автошкол, осуществляющих подготовку водителей транспортных средств в РФ сократилось примерно вдвое.

2. Сокращение количества образовательных учреждений (организаций), осуществляющих подготовку водителей ТС в стране, привело в 2015 году к уменьшению на 24,1% числа граждан, получивших водительские удостоверения.

3. За 2016 год водители-новички со стажем управления до 2 лет совершили меньше всего дорожно-транспортных происшествий – 8,2% от общего количества ДТП из-за нарушений ПДД водителями.

4. Это свидетельствует о том, что автошколы Российской Федерации могут достаточно эффективно осуществлять подготовку, переподготовку и повышение квалификации водителей транспортных средств на основании новых Примерных программ.

Литература:

1. Федеральный закон от 10 декабря 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения». [Электронный ресурс]. URL:http://www.consultant.ru/dokument/cons_dok_LAW_8585/. (дата обращения 12.04.2016).

2. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 26 декабря 2013 г. № 1408 ФЗ «Об утверждении примерных программ профессионального обучения водителей транспортных средств соответствующих категорий и подкатегорий». [Электронный ресурс]. URL:http://www.base.garant.ru/70695708/3/. (дата обращения 12.04.2016).

3. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 18 июня 2010 г. № 636 «Об утверждении Примерных программ подготовки водителей транспортных средств различных категорий». [Электронный ресурс]. URL:http://www.consultant.ru/dokument/cons_dok_LAW_103982/. (дата обращения 12.04.2016).

4. Федеральный закон от 7 мая 2013 г. № 92-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон N 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения». [Электронный ресурс]. URL:http://www.consultant.ru/dokument/cons_dok_LAW_146011/. (дата обращения 12.04.2016).

5. Кодекс Российской Федерации от 5 ноября 2013 г. «Об административных правонарушениях». [Электронный ресурс]. URL:http://www.consultant.ru/law/hotdoks/25537. (дата обращения 12.04.2016).

6. Статистика ДТП за 2015 год: снижение основных показателей аварийности. [Электронный ресурс] URL:maash.ru/index.php?option=com_content&view.statistika.2015 (дата обращения 26.02.2017).

7. Сведения о дорожно-транспортных происшествиях. [Электронный ресурс] URL:https://www.gibdd.ru/stat/html (дата обращения 26.02.2017).

8. Ясенков Е.П., Парфенова Л.А. Первые результаты внедрения новых Примерных программ профессиональной подготовки водителей транспортных средств в Российской Федерации // Механики XXI веку. 2016. № 15. С. 337-342.

9. Сведения о состоянии безопасности дорожного движения. [Электронный ресурс]. URL:https://www.gibdd.ru/stat/html (дата обращения 26.02.2017).

10. Рост смертей в ДТП в России неуклонно растет, не смотря на меры применяемые властями // © Источник 1gai.ru, Eri – 12.08.15. ([Электронный ресурс]. URL:http://www. Igai.ru>501712 opublikovala-svezhuyu...po-dtp. (дата обращения 12.04.2016).

The results of the automotive driver training programme introduction in the Russian Federation

Yasenkov E.P.[a], Parfenova L.A.

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia
[a]bravo-bratsk@yandex.ru

Keywords: automotive driver training, the Russian Federation, road transport accidents, accidents statistics, accidents causes, traffic growth, training quality, automotive training center students

In the Russian Federation there have been introduced 28 Pilot Programmes that provide new driver's category and subcategory. In 2015 – 2016 years period statistics of the road accidents states that the amount of the accidents decreased, practically, as a whole. It should be noted that in this country the inadequate street-and-road system, the traffic regulations inobservance, the traffic growth, the low level drivers training are the main factors that cause a considerable number of road accidents followed with serious consequences. The investigated parametres show that, in accordance with the introduced Programmes, the Russian Federation automotive training centers are able to train the students, provide additional training courses, improve the driver's qualification.

УДК 629.3.027.4

Теоретические исследования автомобильного колеса

Гоибов Н.Р.

ФГБОУ ВО Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
navruz.goibov.93@mail.ru

Ключевые слова: статический радиус, динамический радиус, радиус качения, сила сопротивления качения, коэффициентом сопротивления качению, момент сопротивления качению

Теоретическое исследование взаимодействия пневматической шины с опорной поверхностью представляет собой сложную научную проблему, которая связана с разработкой модели взаимодействия и с описанием процессов при взаимодействии колеса с опорной поверхностью. Эти два процесса тесно взаимосвязаны и взаимодействуют между собой. При этом построение моделей базируется на исследовании экспериментальных материалов и процессов, а теоретические исследования во многих случаях их описывают. В теориях качения колеса большое значение отводится процессам взаимодействия колеса с опорной поверхностью, и принципиально рассматриваются два частично обособленных подхода: процесс относительно «чистого» качения характерный в основном для транспортного режима при движении грузовиков и транспортных машин и процесс тягового режима характерный для землеройно-транспортных машин.

Введение. Теория автомобиля представляет собой научную дисциплину, изучающую эксплуатационные свойства автомобиля, а также расчетные и экспериментальные методы определения этих свойств. Теория автомобиля имеет большое значение для повышения научно технических знаний автомобильного инженера-механика. Все силы, действующие на автомобиль со стороны дороги, передаются через колеса. Радиус колеса, снабженного пневматической шиной, в зависимости от веса груза, режима движения, внутреннего давления воздуха, износа протектора, может изменяться.

Статический радиус определяют по таблицам Госстандарта «Параметры автомобильных шин», где имеются данные для шин при рекомендованных заводом-изготовителем дав-

лении воздуха и вертикальной нагрузке. Если известны номинальные размеры то по диаметру обода d, м; ширине профиля шины $B_ш$ м, рассчитывают статический радиус в предположении равенства ширины и высоты профиля шины: $r_c = 0{,}5d + \lambda_ш B_ш$,

где $\lambda_ш$ - коэффициент смятия, учитывающий уменьшение высоты профиля шины из-за смятия под нагрузкой (для стандартных шин легковых автомобилей $\lambda_ш = 0{,}84...0{,}88$, для шин грузовых автомобилей $\lambda_ш = 0{,}89…0{,}9$).

Радиус качения определяют, как правило, экспериментальным путем. С этой целью измеряют путь S, проходимый колесом за несколько полных оборотов $n_к$, а затем рассчитывают радиус качения: $r_к = S / (2\pi n_к)$

Радиусы статический, динамический и качения одного и того же колеса зависят от вертикальной нагрузки, действующей на колесо, давления воздуха в шине. Динамический радиус зависит, кроме того, от скорости автомобиля и передаваемого крутящего момента для колеса в ведущем режиме: при увеличении скорости он увеличивается, а при увеличении подводимого от двигателя крутящего момента незначительно уменьшается. Радиус качения в значительно большей степени, чем динамический, уменьшается при увеличении передаваемого крутящего момента. Особенно сильно это проявляется в случае проскальзывания колеса ($r_к = \infty$) и при пробуксовке.

Чтобы колесо катилось по опорной поверхности к нему нужно приложить силу или момент. Если направление прилагаемого момента совпадает с направлением вращения колеса, его называют тяговым моментом M_T, в противном случае – тормозным моментом M_{TOP}. Производную $\lambda = \partial r_к / \partial M$: при M = 0 называют коэффициентом тангенциальной эластичности шины и определяют опытным путем.

Если момент не превышает 60% значения, при котором наступает буксование или юз, то зависимость $r_к$ от M можно считать линейной.

Разделив моменты на радиус колеса, получают соответственно тяговую $P_T = M_T / r$ и тормозную $P_T = M_{TOP} / r$ силы, действующие в зоне контакта.

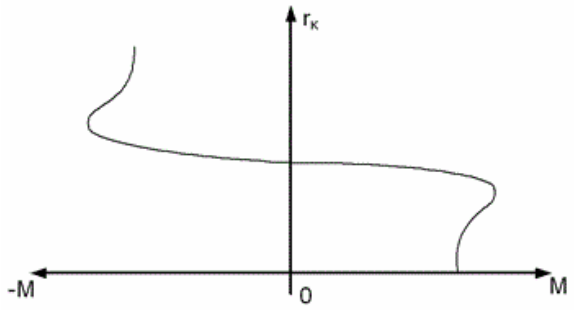
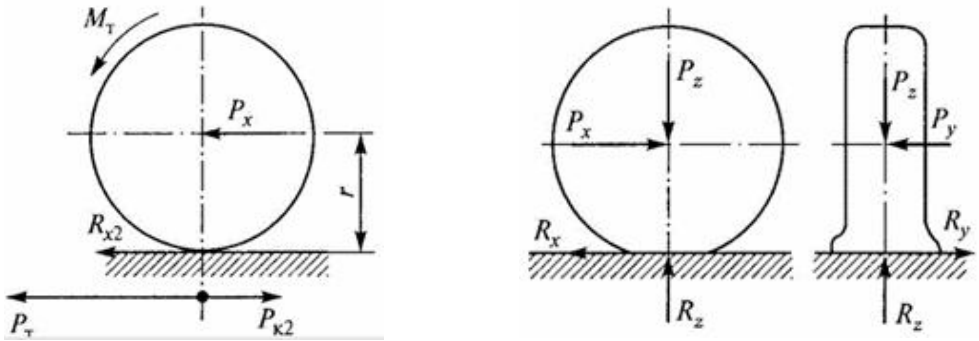


Рис. 1. Зависимость радиуса качения от подведенного момента



а) ведомое колесо *б)* ведущее колесо

Рис.2. Реакции дороги, действующие на колесо

M_T – тяговый момент; P_T – сила тяги; r – радиус колеса; R_X, R_Y, R_Z – касательная, поперечная и нормальная составляющие реакции дороги; P_X, P_Y, P_Z – составляющие всех сил, действующих на колесо; P_{K2} – сила сопротивлению качению ведомого колеса

При движении автомобиля ведущее колесо, вращаясь под действием приложенного к нему момента M_T, стремится сдвинуть назад верхний слой дорожного покрытия. Со стороны дороги на ведущее колесо в зоне контакта действует противоположно направленная сила R_{X2} (рисунок 2, а).

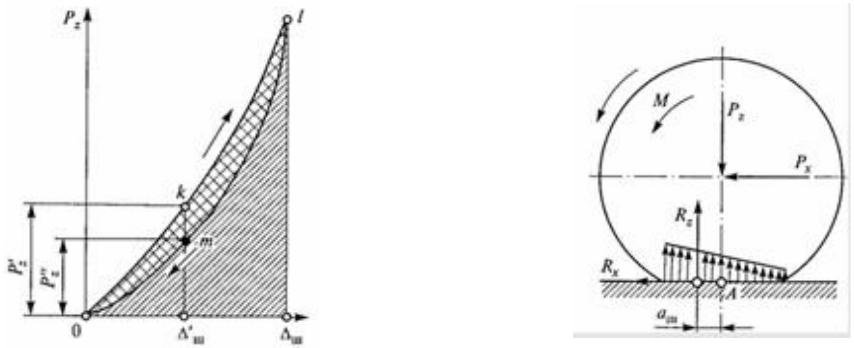
Равнодействующую всех сил, действующих со стороны дороги на колесо в области контакта, называют реакцией дороги. Её можно представить в виде трех составляющих: нормальной R_Z, перпендикулярной дороге (рисунок 2, б), касательной R_X, действующей в плоскости дороги и в плоскости колеса, и поперечной R_Y, лежащей в плоскости дороги и перпендикулярной колесу. Возникновение реакций R_X и R_Y возможно лишь при наличии реакции R_Z.

При качении колеса неизбежны необратимые потери в шинах, поэтому для движения автомобиля используется не вся энергия, подведенная к ведущим колесам автомобиля. Часть ее расходуется на деформацию эластичной пневматической шины. Вследствие молекулярного трения в резине происходит ее нагрев, а энергия, преобразованная таким образом в теплоту – теряется.

Все силы, действующие на автомобиль, для удобства изучения делят на силы движущие и силы, оказывающие сопротивление движению. В соответствии с этим действительную силу R_{X2} (основную составляющую силы сопротивления качению), приложенную к колесу со стороны дороги, условно представляют в виде разности двух сил: силы тяги P_T и силы P_{K2}, учитывающей потери энергии в шинах ведущих колес: $R_{X2} = P_T - P_{K2}$

Сила сопротивления качению – эта сила зависит от деформации шины и дороги, а также от трения шины о покрытие. Во время качения колеса между частями шины вследствие их деформации возникает трение, и выделяющаяся теплота рассеивается, что приводит к потере энергии.

Изменяя деформацию шины $\Delta_Ш$ при нагружении вертикальной нагрузкой P_Z получают зависимость в виде кривой 0kl (Рисунок 3, а). При снятии нагрузки тем же деформациям шины соответствуют меньшие значения нагрузок (кривая lm0). Площадь петли 0klm0 представляет собой в масштабе работу, связанную с необратимыми потерями в шине (на гистерезисные).



а) гистерезисные потери в шине *б)* качение колеса на твердой дороге

Рис.3. Сопротивление качению

При качении колеса деформации в передней части шины увеличиваются, а в задней – уменьшаются. Поэтому при одной и той же деформации $\Delta_Ш$ участок шины в передней ее части относительно центра А пятна контакта нагружен силой P_Z', а участок в задней части – силой P_Z''. Следовательно, элементарные нормальные реакции в передней части контакта больше, чем в задней, а их равнодействующая R_Z – нормальная реакция, смещена относительно вертикального диаметра колеса вперед на расстояние $a_Ш$ (Рисунок 3, б).

В результате смещения точки приложения нормальной реакции возникает момент $R_Z a_Ш$. Для уравновешивания этого момента необходимо к колесу приложить равный, но противоположно направленный момент М, или к оси ведомого колеса приложить толкающую силу P_X, образующую вместе с касательной реакцией дороги пару сил.

Из уравнения моментов сил относительно точки А получим: $P_X = R_Z a_Ш / r$

Отношение $a_Ш / r$ называют коэффициентом сопротивления качению и обозначают буквой f: $f = a_Ш / r = P_X / R_Z$.

Коэффициент сопротивления качению численно равен отношению силы, вызывающей равномерное качение колеса, к нормальной реакции дороги. Отсюда сила сопротивления качению: $P_K = P_X = fR_Z$,, а момент сопротивления качению: $M_K = P_K r = fR_Z r$.

Литература:

1. Мазур В.В. Повышение живучести и безопасности автомобильных шин. Автомобильные шины с упругими деформируемыми спицами // Автотранспортное предприятие. 2008. № 8. С. 37-40.

2. Мазур В.В. Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 41-45.

3. Мазур В.В., Гайлиш А.В., Енаев А.А. Безопасное колесо: пат. 2440250 Рос. Федерация. № заявки 2010127793/11; заявл. 05.07.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2. 5 с.;

4. Мазур В.В., Мазур М.А. Автомобильное колесо повышенной безопасности. Результаты стендовых испытаний // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 2. С. 26-29.

5. Мазур В.В. Математическая модель колебательной системы подвески транспортного средства с поврежденной пневматической шиной // Автотранспортное предприятие. 2009. № 1. С. 44-47.

6. Мазур В.В. Динамическая модель колебательной системы эквивалентной машине с боестойкими колёсами при движении по дорогам с неровными поверхностями // Вестник Академии военных наук. 2013. №4. С. 105-110.

7. Мазур В.В. Динамическая модель колебательной системы эквивалентной машине с боестойкими колёсами при движении по дорогам с неровными поверхностями // Вестник таджикского технического университета. 2013. № 4 (24). С. 69-75.

8. Мазур В.В., Мазур М.А. Колебания колёсной машины с боестойкими колёсами при её движении по дорогам с неровными поверхностями // Автомобильная промышленность. 2014. № 6. С. 13-17.

9. Мазур В.В. Энергоэффективность безопасных пневматических шин при движении автомобиля по неровной дороге // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2012. Т. 1. С. 312-319.

10. Мазур В. В. Колёсные движители военной автомобильной техники с усиленной противоминной защитой // Военная мысль. 2014. № 2. С. 55-58.

11. Мазур В. В. Повышение живучести военной автомобильной техники применением боестойких колёс и шин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. Т. 1. № 1-2. С. 109-115.

12. Мазур В. В. Колёсные движители планетоходов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 5 (78). С. 86-90.

Theoretical study of automotive wheels

Goibov N.R.

Bratsk State University, Makarenko, str. 40, Bratsk, Russia
navruz.goibov.93@mail.ru

Keywords: static radius, dynamic radius, rolling radius, rolling resistance, rolling resistance, rolling resistance

The theoretical study of the interaction of a pneumatic tire with a supporting surface is a complex scientific problem that involves the development of an interaction model and a description of the processes in which the wheel interacts with the support surface. These two processes are closely interrelated and interact with each other. In this case, the construction of models is based on the study of experimental materials and processes, and theoretical studies in many cases describe them. In the theories of wheel rolling, the process of interaction between the wheel and the supporting surface is of great importance, and two partially isolated approaches are considered in principle: the process with respect to "pure" rolling is characteristic mainly for the transport mode during the movement of trucks and transport vehicles, and the traction regime characteristic of earth-moving vehicles.

УДК 620.17

Экспериментальные исследования упругих и демпфирующих свойств колесных движетелей с безвоздушными шинами

Коваль В.С.[a], Захаров Д.С.[b]

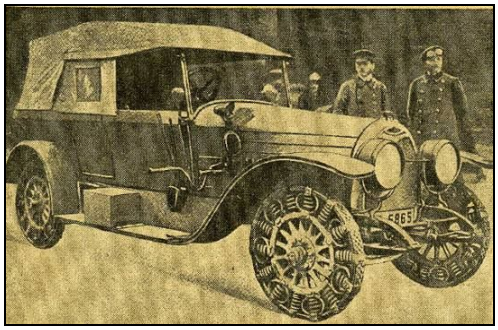
Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] koval.supra@yandex.ru, [b]animal-bmx@mail.ru

Ключевые слова: автомобильные колёса с безвоздушными шинами, упругие свойства, демпфирующие свойства, коэффициент нормальной жёсткости

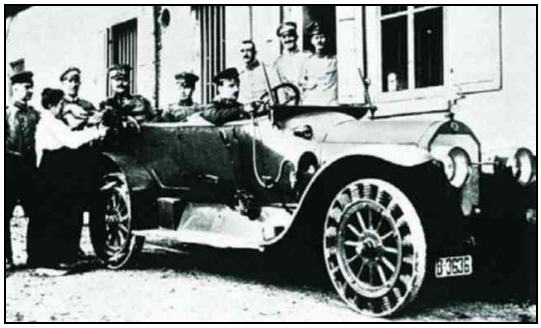
Колёсный движитель является простым и, в то же время, наиболее энергоэффективным механизмом для преобразования своего вращательного движения в поступательное движение наземной машины. Именно поэтому колесо получило широкое распространение и применяется практически на всех наземных транспортных средствах, в том числе и на автомобилях. Изобретение в XIX веке пневматической шины, которая является конструктивным элементом колеса, позволило значительно улучшить эксплуатационные свойства первых автомобилей и обеспечило быстрое развитие автомобильной промышленности. Параметры и характеристики автомобильных шин оказывают существенное влияние на показатели большинства эксплуатационных свойств колёсной машины, такие как плавность хода, управляемость, устойчивость, проходимость. Поэтому экспериментальные исследования упругих и демпфирующих свойств принципиально новых конструкций автомобильных колёс с безвоздушными шинами (колесными движителями), созданных на кафедре "Автомобильный транспорт" Братского государственного университета носят актуальный характер и могут быть использованы в дальнейших исследованиях, что, однозначно говорит о прогрессе в данной сфере исследований.

Введение. Пневматическая шина как конструктивный элемент колеса имеет существенный недостаток, заключающийся в прекращении транспортного процесса при потере избыточного давления сжатого воздуха. Кроме того, внезапная потеря избыточного давления воздуха в пневматической шине при высокой скорости движения машины в большинстве случаев приводит к дорожно-транспортному происшествию. Следует отметить, что изобретатель первой пневматической шины Роберт Уильям Томсон, отмечая преимущества физических свойств сжатого воздуха, указывал на возможность потери его избыточного давления при механических повреждениях и предлагал вместо воздуха заполнять камеру конским волосом или губкой, а также устанавливать металлические пружины и куски натурального каучука или гуттаперчи.

Теоретическая часть. В начале XX века были попытки применения на автомобилях пружинных колёс, упругость которых обеспечивалась не избыточным давлением сжатого воздуха, а свойствами рессорно-пружинных сталей, применяемых для их изготовления. На рисунке 1 приведены фотографические снимки автомобилей того времени с пружинными колёсами. Пневматические шины, конструкция которых быстро совершенствовалась, вытеснили сравнительно недолговечные и тяжёлые пружинные колёса.



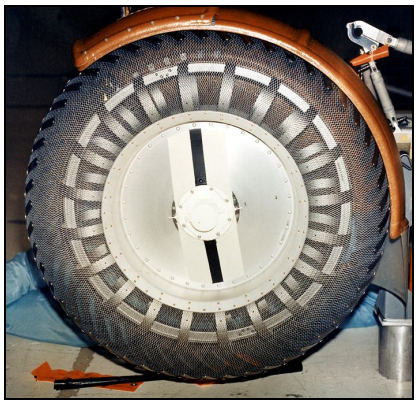
а) на автомобиле Protos



б) на автомобиле Benz

Рис. 1. Пружинные колёса

а) установленные для испытаний на автомобиль ГАЗ-69



б) на планетоходе Apollo Lunar Roving Vehicle

Рис. 2. Колеса с металлоупругими шинами

Тем не менее, колёса с металлоупругими шинами, фотографии которых приведены на рисунке 2, нашли своё применение в качестве движителей планетоходов, экстремальные условия эксплуатации которых не позволяют использовать пневматические шины и резинотехнические материалы.

В настоящее время достижения химии полимеров позволяют создавать принципиально новые конструкции автомобильных шин, имеющие повышенную стойкость к механическим повреждениям и при этом не уступающие по своим эксплуатационным свойствам традиционным пневматическим шинам. Полиуретан как современный полностью синтетический конструкционный материал с проектируемыми физико-механическими свойствами широко применяется для изготовления многих элементов современных автомобилей, в том числе и автомобильных безвоздушных шин.

Разработкой безвоздушных шин с упругими спицами из эластичных полиуретанов активно занимаются ведущие мировые компании-производители автомобильных шин, такие как Michelin, Amerityre, Yokohama, Bridgestone, Hankook и Polaris. В России разработкой автомобильных шин без избыточного давления воздуха активно занимается Научно-исследовательский институт шинной промышленности. В качестве примера на рисунке 3 приведены фотографические снимки современных безвоздушных шин с упругими спицами из эластичных полимерных материалов.

а) Michelin Tweel

б) Bridgestone

в) Polaris

г) Hankook

Рис. 3. Безвоздушные шины с упругими спицами

На кафедре "Автомобильный транспорт" Братского государственного университета также накоплен опыт в разработке и исследовании автомобильных шин с упругими спицами из полиуретановых эластомеров. При финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" была выполнена научно-исследовательская работа “Создание безвоздушных шин для наземных транспортных средств”. Основными задачами, поставленными перед исполнителями научно-исследовательской работы, являлись разработка конструкции и проверка технологической осуществимости изготовления экспериментальных образцов безвоздушных шин для легкового автомобиля, работоспособность которых должна обеспечиваться не избыточным давлением сжатого воздуха, а физико-механическими свойствами конструкционных материалов.

На рисунке 4 приведена фотография автомобиля ВАЗ-2115 с безвоздушными шинами, созданными на кафедре "Автомобильный транспорт". Для изготовления безвоздушных шин применялись эластичные полиуретаны с различными физико-механическими свойствами производства ООО ”СУРЭЛ” (г. Санкт - Петербург) и ФКП "Пермский Пороховой завод".

Рис. 4. Автомобиль ВАЗ-2115 с безвоздушными шинами

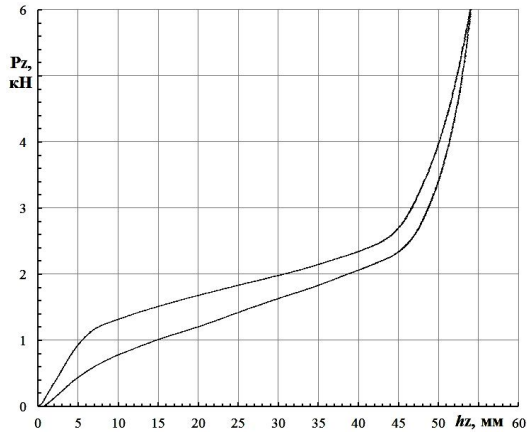
Испытания экспериментальных образцов колёс с безвоздушными шинами были проведены как в дорожных условиях на легковом автомобиле ВАЗ-2115, так и на лабораторных стендах кафедры "Автомобильный транспорт". Оценка упругих и демпфирующих свойств экспериментальных образцов безвоздушных шин осуществлялась по характеристикам их нормальной жёсткости, представляющих собой зависимости нормальной силы от нормального прогиба и полученных в режиме квазистатического непрерывного нагружения автомобильных колёс на плоском твёрдом основании испытательного стенда [1], фотографии которого приведены на рисунке 5. Регистрация нормальной силы осуществлялась с помощью разработанной и изготовленной в рамках научно-исследовательской работы тензометрической ступицы [2, 3] в комплекте с тензометрическим усилителем DN-10W, аналого-цифровым преобразователем ЛА-20USB и ЭВМ. В свою очередь, нормальный прогиб экспериментальных образцов безвоздушных шин регистрировался датчиком линейных перемещений LPS.

а) в процессе испытаний автомобильной безвоздушной шины

б) тензометрическая ступица [2]

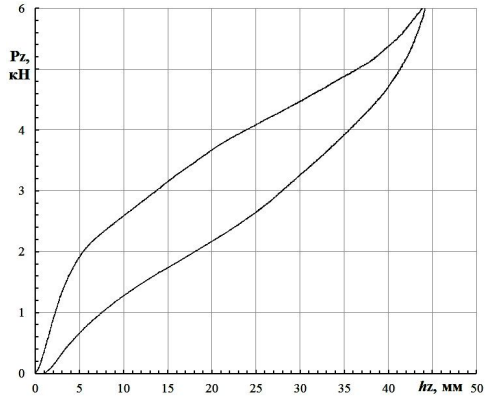
Рис. 5. Стенд для испытаний автомобильных шин

На рисунке 6 в качестве примера приведены полученные в соответствии с ОН 025 305-67 "Методы определения параметров, влияющих на плавность хода автомобиля" характеристики нормальной жёсткости экспериментальных образцов автомобильных безвоздушных шин. Информация о применяемых для изготовления экспериментальных образцов безвоздушных шин эластичных полимерных материалах приведена в таблице 1.

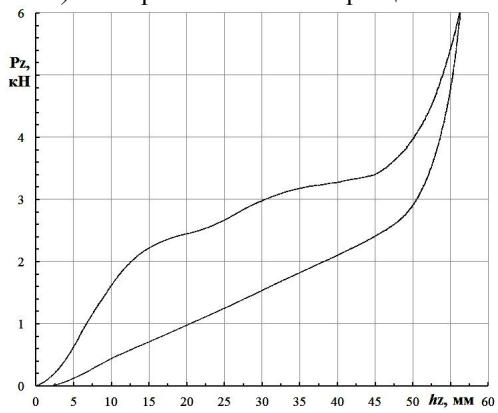


а) экспериментального образца №1

б) экспериментального образца №2



в) экспериментального образца №3



г) экспериментального образца №4

Рис. 6. Характеристики нормальной жёсткости автомобильных безвоздушных шин

Таблица 1

Эластичные полиуретаны, применяемые для изготовления экспериментальных образцов колёс с безвоздушными шинами

№ экспериментального образца колеса с безвоздушной шиной	Толщина спиц, мм	Форполимер спиц / протектора	Твёрдость материала по Шору спиц / протектора	Цвет красителя спиц / протектора
1	5	СУРЭЛ ТФ-235	85, шкала А	красный
		СУРЭЛ ТФ-228	80, шкала А	зелёный
2	8	УР-70В	80, шкала А	зелёный
		СКУ-ПФЛ-100	96, шкала А	чёрный
3	5	СКУ-Ф-Э4, марка Б	85, шкала А	не окрашены
		СКУ-Ф-Э4*, марка Б	85, шкала А	чёрный
4	5	СКУ-Ф-Э4, марка Б	85, шкала А	не окрашены
		без протектора, спицы армированы капроновыми нитями		

* с добавлением 30% резинового порошка.

Литература:

1. Рыков С.П. Экспериментальные исследования поглощающей и сглаживающей способности пневматических шин: Оборудование, измерительный комплекс, методики проведения экспериментов и обработки результатов: Учеб. пособие. - Братск: БрГТУ, 2002. - 330 с.;

2. Патент №2382346 РФ. Способ определения жёсткости и неупругого сопротивления автомобильной шины и стенд для испытаний автомобильных шин / ГОУ ВПО "Братский государственный университет" / В.В. Мазур - 2008148407/11, заявлено 08.12.2008; опубл. 20.02.2010; бюл. №5;

3. Авторское свидетельство №1515077 СССР. Устройство для измерения сил на колесе транспортного средства / Братский индустриальный институт / С.П. Рыков, В.Г. Мелентьев

4. Мазур В.В. Повышение живучести и безопасности автомобильных шин. Автомобильные шины с упругими деформируемыми спицами. Автотранспортное предприятие. 2008. № 8. С. 37-40.

5. Мазур В.В. Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин. Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 41-45.

6. Мазур В.В. Технология изготовления автомобильных шин с упругими деформируемыми спицами из эластичного полиуретана. Автотранспортное предприятие. 2010. № 5. С. 27-29.

7. Мазур В.В., Гайлиш А.В. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами. Автотранспортное предприятие. 2011. № 12. С. 36-38.

8. Мазур В.В., Гайлиш А.В., Енаев А.А. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами. Автомобильная промышленность. 2012. № 7. С. 10-12.

9. Мазур В.В., Мазур М.А. Расчётная оценка конструктивных элементов полиуретановых шин. Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 32-39.

10. Мазур В.В., Мазур М.А. Экспериментальная оценка способности автомобильных безвоздушных шин самоочищаться от грязи. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 78-82.

11. Мазур В.В. Мазур М.А. Непневматические колёса и шины. Краткий исторический обзор и современные конструкции. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 17-28.

12. Любартович С.А., Шуманов Л.А., Веселов И.В. Полиуретановые шины. Проблемы шин и резинокордных композитов. 2005. № 3. С. 7-14.

Experimental studies of the elastic and damping properties of propulsors wheel with airless tire

Koval V.S.[a], Zakharov D.S.[b]

Bratsk state University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]koval.supra@yandex.ru, [b]animal-bmx@mail.ru

Keywords: car wheels with airless tires, elastic properties, damping properties, the coefficient of the normal stiffness

A propulsion Wheel is a simple and, at the same time, the most energy efficient mechanism to convert its rotary motion into the translational motion of ground vehicles. That is why the wheel is widespread and is used on almost all terrestrial vehicles, including cars. The invention in the nineteenth century, the pneumatic tire, which is a constructive element of the wheel has greatly improved the performance properties of the first car and resulted in the rapid development of the automotive industry. Parameters and characteristics of automobile tires have a significant impact on the performance most of the performance of wheeled vehicles, such as ride, handling, stability, permeability. Therefore, experimental studies of elastic and damping properties of fundamentally new designs of car wheels with airless tires (paddle wheels), developed at the Department "road transport" Bratsk state University are relevant and can be used in further studies, which clearly indicates progress in this field of research.

УДК 629.113.001.1:625.7.032.4

Исследование плавности хода автомобиля с пневматическими шинами повышенной безопасности

Гринштейн Н.М.

Братский Государственный Университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия.
Vclub1@rambler.ru

Ключевые слова: автомобильные пневматические шины повышенной безопасности, плавность хода автомобиля, амплитудно-частотная характеристика

Современные автомобили с пневматическими шинами повышенной безопасности при потере избыточного давления сжатого воздуха способны продолжать движение, несмотря на снижение показателей эксплуатационных свойств. Моделирование и теоретические исследования плавности хода как основного эксплуатационного свойства автомобиля при движении по неровным дорогам, в том числе и без избыточного давления сжатого воздуха в пневматических шинах, позволяют совершенствовать конструкции автомобильных колёс и заметно сокращать сроки проектирования систем подрессоривания. Научные исследования, направленные на улучшение эксплуатационных свойств автомобиля как колебательной системы, изменяющейся при потере избыточного давления сжатого воздуха в одной или нескольких пневматических шинах, являются актуальными.

Современные пневматические шины повышенной безопасности даже в повреждённом состоянии без избыточного давления воздуха способны обеспечить устойчивое и управляемое движение транспортного средства без замены и разрушения со скоростью не менее 80 км/ч на расстояние 200 км и более, что в настоящее время не является пределом совершенства их конструкции. Тем не менее, движение автомобиля с одной или несколькими пневматическими шинами без избыточного давления воздуха по дорогам с неровными поверхностями сопровождается более интенсивными колебаниями, которые оказывают существенное влияние на показатели большинства эксплуатационных свойств колёсной машины, вызывают неприятные ощущения и быструю утомляемость водителя и пассажиров, приводят к повреждениям грузов и разрушениям элементов шасси и кузова [1–17].

Для теоретической оценки плавности хода автомобиля была построена математическая модель эквивалентной ему колебательной системы. Наибольшее число схем колебательной системы определяется техническим состоянием пневматических шин, то есть их количеством при номинальном избыточном давлении сжатого воздуха и без него и относительным расположением. На рисунке 1 в качестве примера изображена стереометрическая схема колебательной системы эквивалентной автомобилю, передняя левая пневматическая шина повышенной безопасности которого без избыточного давления сжатого воздуха.

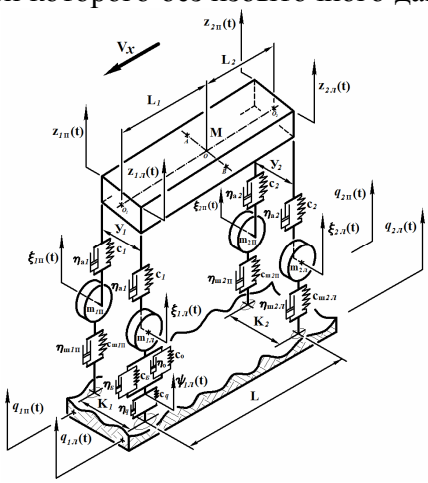


Рис. 1. Схема колебательной системы эквивалентной автомобилю,
передняя левая пневматическая шина которого без избыточного давления сжатого воздуха

На схеме приняты следующие обозначения: M – подрессоренная масса; $m_{1П}, m_{1Л}, m_{2П}, m_{2Л}$ – неподрессоренные массы, сосредоточенные над правыми и левыми колёсами передней и задней осей колёсной машины; c_1 и c_2 – коэффициенты жёсткости упругих элементов передней и задней подвесок; η_{a1} и η_{a2} – коэффициенты неупругого сопротивления гидравлических амортизаторов передней и задней подвесок; $c_{Ш1П}$, $c_{Ш2П}$, $c_{Ш2Л}$ – коэффициенты нормальной жёсткости пневматических шин при номинальном избыточном давлении сжатого воздуха; $\eta_{Ш1П}$, $\eta_{Ш2П}$, $\eta_{Ш2Л}$ – коэффициенты неупругого сопротивления пневматических шин при номинальном избыточном давлении сжатого воздуха; $c_О$ – коэффициент нормальной жёсткости упругой опоры; $c_Б$ – коэффициент нормальной жёсткости боковин пневматической шины; c_q – коэффициент нормальной жёсткости протектора пневматической шины; $\eta_О$ – коэффициент неупругого сопротивления упругой опоры; $\eta_Б$ – коэффициент неупругого сопротивления боковин пневматической шины; η_q – коэффициент неупругого сопротивления протектора пневматической шины; K_1 – колея передних колёс; K_2 – колея задних колёс; $У_1$ – расстояния между упругими элементами передней подвески; $У_2$ – расстояния между упругими элементами задней подвески; L – база колёсной машины; L_1 – расстояние от центра тяжести колёсной машины до оси передних колёс; L_2 – расстояние от центра тяжести колёсной машины до оси задних колёс; $z_{1П}(t)$, $z_{1Л}(t)$, $z_{2П}(t)$, $z_{2Л}(t)$ – вертикальные перемещения подрессоренной массы; $\xi_{1П}(t)$, $\xi_{1Л}(t)$, $\xi_{2П}(t)$, $\xi_{2Л}(t)$ – вертикальные перемещения неподрессоренных масс; $\Psi_{1Л}$ – вертикальное перемещение контактной поверхности упругой опоры; $q_{1П}(t)$, $q_{1Л}(t)$, $q_{2П}(t)$, $q_{2Л}(t)$ – ординаты микропрофиля дорожной поверхности; V_X – скорость движения колёсной машины.

Для описания процессов вертикальных и угловых колебаний колёсной машины была составлена система дифференциальных уравнений второго порядка. После алгебраических преобразований система дифференциальных уравнений, описывающая колебания колёсной машины с пневматическими шинами повышенной безопасности, одна из которых (передняя левая) без избыточного давления сжатого воздуха, будет иметь следующий вид:

$$
\begin{cases}
M_{1П}\ddot{z}_{1П} + M_{1Л}\ddot{z}_{1Л} + M_{2П}\ddot{z}_{2П} + M_{2Л}\ddot{z}_{2Л} + \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1П} - \dot{\xi}_{1П}\right) + \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1Л} - \dot{\xi}_{1Л}\right) + \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2П} - \dot{\xi}_{2П}\right) + \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2Л} - \dot{\xi}_{2Л}\right) + c_1\left(z_{1П} - \xi_{1П}\right) + \\
+ c_1\left(z_{1Л} - \xi_{1Л}\right) + c_2\left(z_{2П} - \xi_{2П}\right) + c_2\left(z_{2Л} - \xi_{2Л}\right) = 0; \\
\\
\left(\ddot{z}_{2П} - \ddot{z}_{2Л}\right)У_1 - \left(\ddot{z}_{1П} - \ddot{z}_{1Л}\right)У_2 = 0; \\
\\
\dfrac{J_У}{2L}\left(\ddot{z}_{2П} + \ddot{z}_{2Л} - \ddot{z}_{1П} - \ddot{z}_{1Л}\right) + \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2П} - \dot{\xi}_{2П}\right)L_2 + \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2Л} - \dot{\xi}_{2Л}\right)L_2 - \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1П} - \dot{\xi}_{1П}\right)L_1 - \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1Л} - \dot{\xi}_{1Л}\right)L_1 + c_2\left(z_{2П} - \xi_{2П}\right)L_2 + \\
+ c_2\left(z_{2Л} - \xi_{2Л}\right)L_2 - c_1\left(z_{1П} - \xi_{1П}\right)L_1 - c_1\left(z_{1Л} - \xi_{1Л}\right)L_1 = 0; \\
\\
\dfrac{J_X}{У_О Б}\left(\ddot{z}_{2П}Б_1 + \ddot{z}_{1П}Б_2 - \ddot{z}_{2Л}Б_1 - \ddot{z}_{1Л}Б_2\right) + \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1П} - \dot{\xi}_{1П}\right)У_1 + \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2П} - \dot{\xi}_{2П}\right)У_2 - \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1Л} - \dot{\xi}_{1Л}\right)У_1 - \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2Л} - \dot{\xi}_{2Л}\right)У_2 + \\
+ c_1\left(z_{1П} - \xi_{1П}\right)У_1 + c_2\left(z_{2П} - \xi_{2П}\right)У_2 - c_1\left(z_{1Л} - \xi_{1Л}\right)У_1 - c_2\left(z_{2Л} - \xi_{2Л}\right)У_2 = 0; \\
\\
m_{1П}\ddot{\xi}_{1П} + \eta_{Ш1П}\left(\dot{\xi}_{1П} - \dot{q}_{1П}\right) + c_{Ш1П}\left(\xi_{1П} - q_{1П}\right) - \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1П} - \dot{\xi}_{1П}\right) - c_1\left(z_{1П} - \xi_{1П}\right) = 0; \\
\\
m_{2П}\ddot{\xi}_{2П} + \eta_{Ш2П}\left(\dot{\xi}_{2П} - \dot{q}_{2П}\right) + c_{Ш2П}\left(\xi_{2П} - q_{2П}\right) - \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2П} - \dot{\xi}_{2П}\right) - c_2\left(z_{2П} - \xi_{2П}\right) = 0; \\
\\
m_{2Л}\ddot{\xi}_{2Л} + \eta_{Ш2Л}\left(\dot{\xi}_{2Л} - \dot{q}_{2Л}\right) + c_{Ш2Л}\left(\xi_{2Л} - q_{2Л}\right) - \eta_{a2}\left(\dot{z}_{2Л} - \dot{\xi}_{2Л}\right) - c_2\left(z_{2Л} - \xi_{2Л}\right) = 0; \\
\\
m_{1Л}\ddot{\xi}_{1Л} + \dfrac{\left(\eta_О + \eta_Б\right)\eta_q}{\eta_О + \eta_Б + \eta_q}\left(\dot{\xi}_{1Л} - \dot{q}_{1Л}\right) + \dfrac{\left(c_О + c_Б\right)c_q}{c_О + c_Б + c_q}\left(\xi_{1Л} - q_{1Л}\right) - \eta_{a1}\left(\dot{z}_{1Л} - \dot{\xi}_{1Л}\right) - c_1\left(z_{1Л} - \xi_{1Л}\right) = 0.
\end{cases}
$$

В системе дифференциальных уравнений J_y и J_x – моменты инерции подрессоренной массы относительно поперечной оси y и продольной оси x, проходящих через центр тяжести; $M_{1п}$, $M_{1л}$, $M_{2п}$ и $M_{2л}$ – подрессоренные массы, приходящиеся на правые и левые колёса передней и задней осей колёсной машины.

Подрессоренные массы с учётом указанных выше индексов принадлежности определяются следующим образом:

$$M_{1п} = \frac{ML_2}{2L};\ M_{1л} = \frac{ML_2}{2L};\ M_{2п} = \frac{ML_1}{2L}\ \text{и}\ M_{2л} = \frac{ML_1}{2L}.$$

В свою очередь, моменты инерции подрессоренной массы относительно поперечной и продольной осей можно определить как

$$J_y = M_{1п}L_1^2 + M_{1л}L_1^2 + M_2\ L_2^2 + M_{2л}L_2^2;$$

$$J_x = M_{1п}\left(\frac{У_1}{2}\right)^2 + M_{1л}\left(\frac{У_1}{2}\right)^2 + M_{2п}\left(\frac{У_2}{2}\right)^2 + M_{2л}\left(\frac{У_2}{2}\right)^2.$$

Кроме того, в системе дифференциальных уравнений приведены необходимые для расчётов геометрические параметры колебательной системы эквивалентной автомобилю, а именно:

$$У_O = \frac{У_1L_2 + У_2L_1}{L},\ Б_1 = \sqrt{L_1^2 + \left(\frac{У_O - У_1}{2}\right)^2},\ \ Б = \sqrt{L^2 + \left(\frac{У_2 - У_1}{2}\right)^2},\ Б_2 = Б - Б_1.$$

Разработанные на языке Visual Basic программы для ЭВМ [1, 2] позволяют теоретически оценить плавность хода автомобилей с пневматическими шинами повышенной безопасности и упругими опорами, ограничивающими деформацию колеса при потере избыточного давления воздуха.

На рисунке 2 в качестве примера приведены амплитудно-частотные характеристики вертикальных ускорений передней подрессоренной массы автомобиля ГАЗ-39371.

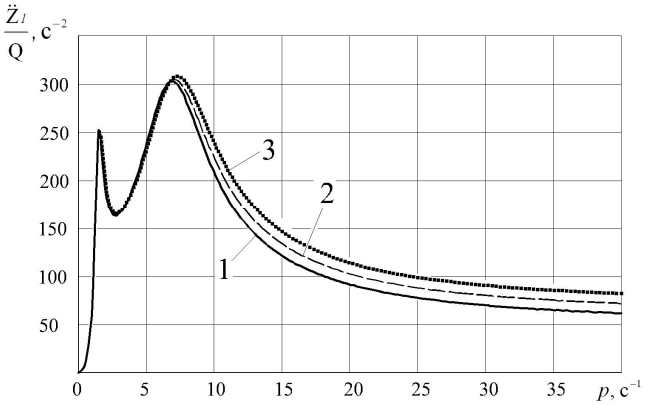


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики вертикальных ускорений передней подрессоренной массы автомобиля ГАЗ-39371: 1 - с избыточным давлением сжатого воздуха в пневматических шинах; 2 - без избыточного давления сжатого воздуха в пневматической шине переднего левого колеса; 3 - без избыточного давления сжатого воздуха в пневматических шинах передних колёс

Как и следовало ожидать, при потере избыточного давления сжатого воздуха в одной или нескольких пневматических шинах из-за увеличения упругого и неупругого сопротивлений колёсного движителя плавность хода автомобиля заметно ухудшается. Для решения этой проблемы на кафедре "Автомобильный транспорт" Братского государственного университета разрабатывается конструкция колеса [3] с внутренней опорой со спицами из эластичного полиуретана. Возможность уменьшения нормальной жёсткости упругой опоры без увеличения бокового увода колёсного движителя, а также уменьшение гистерезисных потерь в связи с уменьшением массы опоры и применением для её изготовления новых конструкционных материалов позволят сохранить более высокий уровень плавности хода автомобиля при механических повреждениях пневматических шин.

Литература:

1. Мазур В.В. Повышение живучести и безопасности автомобильных шин. Автомобильные шины с упругими деформируемыми спицами // Автотранспортное предприятие. 2008. № 8. С. 37-40.
2. Мазур В.В. Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 41-45.
3. Мазур В.В. Технология изготовления автомобильных шин с упругими деформируемыми спицами из эластичного полиуретана // Автотранспортное предприятие. 2010. № 5. С. 27-29.
4. Мазур В.В., Гайлиш А.В. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами // Автотранспортное предприятие. 2011. № 12. С. 36-38.
5. Мазур В.В., Гайлиш А.В., Енаев А.А. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами // Автомобильная промышленность. 2012. № 7. С. 10-12.
6. Мазур В.В., Мазур М.А. Расчётная оценка конструктивных элементов полиуретановых шин. Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4 (20). С. 32-39.
7. Мазур В.В., Мазур М.А. Экспериментальная оценка способности автомобильных безвоздушных шин самоочищаться от грязи. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 78-82.
8. Мазур В.В. Мазур М.А. Непневматические колёса и шины. Краткий исторический обзор и современные конструкции. Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 17-28.
9. Любартович С.А., Шуманов Л.А., Веселов И.В. Полиуретановые шины // Проблемы шин и резинокордных композитов. 2005. № 3. С. 7-14.
10. Русакова А.А. Влияние химического состава полиуретановых эластомеров на их сцепные свойства: дис. канд. техн. наук. Москва: НИИШП, 2002. 254 с.
11. Басс Ю.П., Дмитриев И. И., Кравцов Е. И., Любартович С. А., Шуманов Л. А. Агрегированная шина (варианты): пат. № 8308 Рос. Федерация. № заявки 98104620/20; заявл. 26.03.1998; опубл. 16.11.1998.
12. Мазур В.В. Способ определения жёсткости и неупругого сопротивления автомобильной шины и стенд для испытаний автомобильных шин: пат. № 2382346 Рос. Федерация. № заявки 2008148407/11; заявл. 08.12.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 9 с.
13. Яценко Н. Н., Енаев А.А. Колебания автомобиля при торможении. Иркутск: изд-во Иркут. ун-та, 1989. 248 с., ил.
14. Мазур В.В. Повышение плавности хода автотранспортных средств внутренним подрессориванием колёс: дис. канд. техн. наук. Братск: БрГТУ, 2004. 151 с.
15. Мазур В.В. Колёсные движители военной автомобильной техники с усиленной противоминной защитой // Военная мысль. 2014. № 2. С. 55-58.
16. Мазур В. В. Повышение живучести военной автомобильной техники применением боестойких колёс и шин. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. Т. 1. № 1-2. С. 109-115.
17. Мазур В. В. Колёсные движители планетоходов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 5 (78). С. 86-90.

Study of the smoothness of the car with pneumatic tires of increased safety

Grinshteyn N.M.

Bratsk state University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
Vclub1@rambler.ru

Keywords: automobile pneumatic tires of increased safety, smoothness of the cars progress, amplitude-frequency characteristic

Modern cars with pneumatic tires of increased safety with the loss of excess pressure of compressed air are able to continue to move, despite a decline in performance indicators. Modeling and theoretical studies of smooth running as the main operational property of the car when driving on uneven roads, including without excessive pressure of compressed air in pneumatic tires, allow improving the design of automobile wheels and significantly shortening the design time of the suspension system. Scientific research aimed at improving the performance of the car as an oscillating system, changing when the excess pressure of compressed air is lost in one or more pneumatic tires are relevant.

УДК 629.3.027.4

Анализ конструкций колёс с безвоздушными шинами

Мухиддинзода К.Д.[1,a], Гоивоб Н.Р.[2,b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40,Братск, Россия
[a]Mukhiddinzoda.@mail.ru. [b]navruz.goibov.93@mail.ru

Ключевые слова: динамические нагрузки, тягово-сцепные свойства, массивные шины, резиновое кольцо, коммерческие автомобили, квазистатический режим

Автомобильные колеса предназначены для снижения динамических нагрузок на машину со стороны неровностей дорожной поверхности, а также для обеспечения высоких тягово-сцепных свойств Конструкция первой массивной шины представляла толстое сплошное резиновое кольцо прямоугольного сечения, которое крепилось к колесу в процессе вулканизации натурального каучука. Например, американский производитель квадроциклов Polaris уже запустил в массовое производство шины для коммерческих авто, которым не страшны проколы, Michelin в 2014 построил первое в мире предприятие по производству безвоздушных радиальных шин, которые с успехом применяются в различных вездеходах и сельскохозяйственной технике. Опыт боевых действий позволил установить, что колёса с безвоздушными шинами являются компромиссом между максимальной скоростью машины и её способностью продолжать движение при подрыве на мине или самодельном взрывчатом устройстве.

Введение. Автомобильные колеса предназначены для снижения динамических нагрузок на машину со стороны неровностей дорожной поверхности, а также для обеспечения высоких тягово-сцепных свойств. Впервые разработкой безвоздушных шин занялась компания Michelin в 2005 году, на североамериканском международном автошоу в Детройте представила колеса с безвоздушными шинами из полиуретановых эластомеров. Компания Michelin представила колёса MichelinTweel, в качестве «амортизатора» в данном колесе выступают легкие композитные вставки между протектором и колесным диском представлено.

Рис 1. колесо с безвоздушной шиной MichelinTweel на легковом автомобиле Audi A4 и Michelin X-Tweel SSL на фронтальном погрузчике CAT Loader

Конструкция этой новинки несложная. В центре расположен деформируемый диск, который окружен полиуретановыми спицами. Обод колеса – протектор ничем не отличается от обычного, кроме того, что он может быть заменен на новый. Кроме того, изобретателем был предложен вариант пневматической шины с повышенной стойкостью к механическим повреждениям, упругие свойства которой обеспечивались расположенным внутри кожаной покрышки набором из девяти перевязанных в нескольких местах тонких трубок со сжатым воздухом, что образовывало независимые при потере избыточного давления секции.

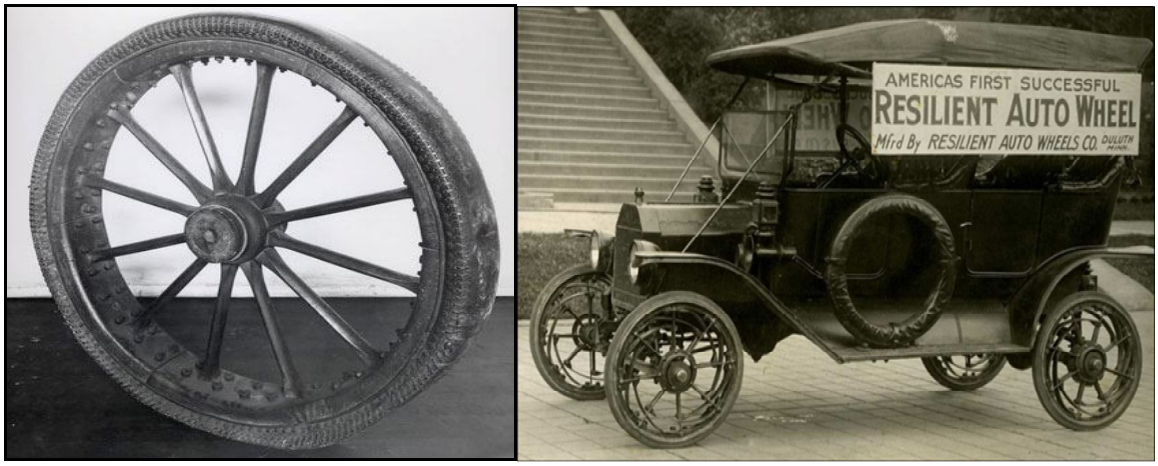


Рис.2 Колесо с пневматической шиной изображено Р.У. Томсоном

На кафедре автомобильного транспорта Братского государственного университета накоплен опыт в разработке и испытаниях колёсных движителей, упругие свойства которых обеспечиваются физико-механическими свойствами эластичных полиуретанов и рессорно-пружинных сталей.[1-14].

За время исследовательской работы в этом направлении было предложено большое число технических решений, направленных на создание и совершенствование конструкций безвоздушных колёсных движителей, способов и технологической оснастки для их изготовления

Рис 3. Экспериментальные образцы колёс с безвоздушными шинами

Испытания экспериментальных образцов колес с безвоздушными шинами проводились на стендах кафедры «Автомобильный транспорт» и на легковом автомобиле ВАЗ-2115 (рис. 4).

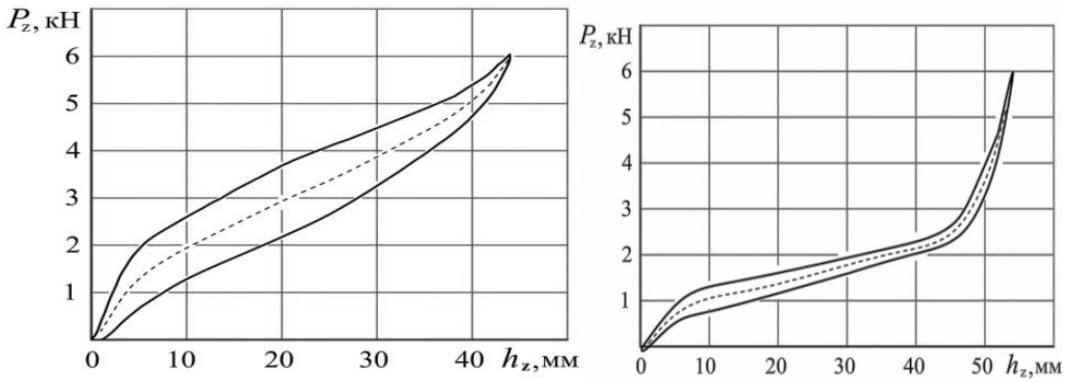


Рис 4. Характеристики нормальной жёсткости автомобильных шин:
1 - образца № 1; 2 - образца № 2; - пневматической шины БЛ-85 175/70R13

Методы определения основных параметров, влияющих на плавность хода" по характеристикам нормальной жёсткости и кривым свободных затухающих колебаний надколёсной массы при сбрасывании или подтягивании.

На кафедре автомобильного транспорта БрГУ в рамках программы экспериментальных исследований были проведены стендовые испытания экспериментальных образцов колёс с безвоздушными шинами, направленные на определение параметров влияющих на плавность хода автомобиля.

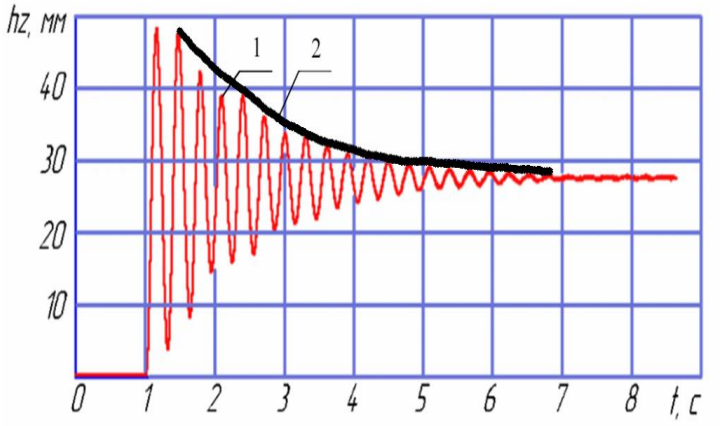


Рис. 5. кривая свободных затухающих колебаний при сбрасывании колесной рамы с установленной пневматической шиной 175 70R13:
1 – экспериментальна кривая;
2 – кривая проходящая через амплитудные точки экспериментальной кривой

Коэффициенты неупругого сопротивления колёс определялись по кривым свободных затухающих колебаний, полученных при сбрасывании надколесной рамы. В ходе эксперимента осуществлялся подъём колесной рамы до момента начала отрыва колеса от опорной поверхности и последующее его сбрасывание.

На рис 5 приведена кривая свободных затухающих колебаний при сбрасывании колесной рамы с установленной пневматической шиной 175 70R13.

Литература:

1. Мазур В.В. Повышение живучести и безопасности автомобильных шин. Автомобильные шины с упругими деформируемыми спицами // Автотранспортное предприятие. 2008. № 8. С. 37-40.
2. Мазур В.В. Способы повышения живучести и безопасности автомобильных шин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 41-45.
3. Мазур В.В. Технология изготовления автомобильных шин с упругими деформируемыми спицами из эластичного полиуретана // Автотранспортное предприятие. 2010. № 5. С. 27-29.
4. Мазур В.В., Гайлиш А.В. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами // Автотранспортное предприятие. 2011. № 12. С. 36-38.
5. Мазур В.В., Гайлиш А.В., Енаев А.А. Автомобильные колёса с безвоздушными шинами // Автомобильная промышленность. 2012. № 7. С. 10-12.
6. Мазур В.В., Мазур М.А. Экспериментальная оценка способности автомобильных безвоздушных шин самоочищаться от грязи // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3 (23). С. 78-82.
7. Мазур В.В. Мазур М.А. Непневматические колёса и шины. Краткий исторический обзор и современные конструкции // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 17-28.
8. Мазур В.В. Мазур М.А. Непневматические колёса и шины. Краткий исторический обзор и современные конструкции // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 2. С. 17-28.
9. Мазур В.В. Способ определения жёсткости и неупругого сопротивления автомобильной шины и стенд для испытаний автомобильных шин: пат. № 2382346 Рос. Федерация. № заявки 2008148407/11; заявл. 08.12.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 9 с.

10. Яценко Н.Н., Енаев А.А. Колебания автомобиля при торможении. Иркутск: изд-во Иркут. ун-та, 1989. 248 с., ил.

11. Мазур В.В. Повышение плавности хода автотранспортных средств внутреннимподрессориванием колёс: дис. канд. техн. наук. Братск: БрГТУ, 2004. 151 с.

12. Мазур В.В. Колёсные движители военной автомобильной техники с усиленной противоминной защитой // Военная мысль. 2014. № 2. С. 55-58.

13. Мазур В.В. Повышение живучести военной автомобильной техники применением боестойких колёс и шин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2015. Т. 1. № 1-2. С. 109-115.

14. Мазур В.В. Колёсные движители планетоходов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 5 (78). С. 86-90

Alysis of designs of wheels with airless tires

Muhiddinzoda K.D.[1,a], Goibov N.R.[2,b]

Bratsk State University, ul.Makarenko, 40, Bratsk, Russia.
[a]Mukhiddinzoda.@mail.ru, [b]navruz.goibov.93@mail.ru

Keywords: dynamic loads, traction properties massivnoye tires, rubber ring, vans, quasi-static mode

Car wheels are designed to reduce the dynamic loads on the machine by the roughness of the road surface, as well as to provide high traction properties of the design of the first solid tires represented a thick solid rubber ring of rectangular cross section, which is attached to the wheel in the process of vulcanization of natural rubber. For example, the American manufacturer of ATVs Polaris has launched mass production of tires for commercial vehicles, which are not afraid of punctures, the Michelin in 2014 to build a plant for the production of airless radial tire first in the world which have been successfully applied in a variety of off-road vehicles and agricultural machinery. Combat experience revealed that the wheels with airless tires are a compromise between the maximum speed of the machine and its ability to continue to move at a landmine or improvised explosive devices.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 624.132.3.002.5:621.879

Использование ремонтно-восстановительных составов для снижения адгезии грунтов к рабочим органам машин

Зеньков С.А.[a], Минеев Д.А.[b]
Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mf@brstu.ru,[b]mineev_67@mail.ru

Ключевые слова: ремонтно-восстановительный состав, адгезия, рабочий орган машины, грунт

В данной статье рассматривается вопрос влияния ремонтно-восстановительных составов на процесс налипания грунтов к рабочим органам землеройных машин. Адгезионные силы можно снизить путем создания промежуточного слоя на границе раздела фаз системы «поверхность рабочего органа – обрабатываемая среда. Этот слой выполняет функцию экрана для сил межмолекулярного взаимодействия фаз, обладает малым адгезионым и когезионным взаимодействием и обладает «смазочным» действием, т.е. обеспечивает возможность относительного перемещения фазовых рабочих поверхностей. Проведена экспериментальная работа в соответствии с математической теорией планирования экспериментов (план Бокса-3). После обработки эксперимента были получены графические зависимости усилия сдвига с поверхности без ремонтно-восстановительных составов и с использованием ремонтно-восстановительных составов. Проведенные эксперименты показали, что при нанесении РВС наблюдается снижение адгезии грунта к металлической поверхности рабочего органа землеройной машины в среднем на 18 %.

Введение. Адгезия грунта это явление возникновения связей, обусловленное межмолекулярным взаимодействием. Она проявляется как в виде сил смерзания при минусовой температуре и в виде сил прилипания при плюсовой температуре. Адгезионные силы можно снизить путем создания промежуточного слоя на границе раздела фаз системы «поверхность рабочего органа – обрабатываемая среда. Этот слой выполняет функцию экрана для сил межмолекулярного взаимодействия фаз, обладает малым адгезионым и когезионным взаимодействием и обладает «смазочным» действием, т.е. обеспечивает возможность относительного перемещения фазовых рабочих поверхностей [1-18]. Одним из эффективных представителей для выполнения функции разделителя фаз – создателя промежуточного слоя являются ремонтно-восстановительные составы (РВС) [9,11].

Постановка задачи. Рассмотреть РВС в качестве профилактического метода для образования промежуточного слоя на границе взаимодействия металлической поверхности рабочего органа землеройной машины с разрабатываемым грунтом с целью снижения адгезии грунта.

Метод решения задачи. РВС – это многокомпонентные тонкодисперсные смеси минералов и специальных добавок. В большом разнообразии технологических свойств минералов хуже всего изучены их триботехнические характеристики. Поэтому в настоящее время ограничено их применение для решения задач в области смазочных способностей. Гео-активаторы РВС используются для повышения физико-механических способностей работы узлов трения при различных сочетаниях материалов взаимодействующих поверхностей. В силу своей уникальности, гео-активаторы РВС обладают способностью значительно уменьшить влияние ведущих факторов, влияющих на износ механизмов. Механизм возникновения антифрикционного защитного слоя можно охарактеризовать следующей последовательностью этапов: суперфинишная операция, очистка микрорельефа, плотная нагартовка частиц

РВС в углублениях микрорельефа, операция образования металлокерамического слоя. Исследовав вышеназванный процесс и структуру слоя, следует допустить, что этот материал (РВС) можно использовать для уменьшения адгезии грунта к рабочим органам землеройных машин. Это уменьшение позволит снизить трудозатраты и время на производство работ. Для определения адекватности этой гипотезы были выполнены сравнительные эксперименты с нанесённым слоем и без него и с варьирование разных условий: давлением на грунт, температурой наружного воздуха. Испытываемой моделью для экспериментов служил имитатор передней стенки ковша экскаватора, который представляет собой металлический ящик с установленными на него устройствами, воздействующими на грунт. Имитатор закреплен на тележке, имеющей возможность перемещаться с помощью электродвигателя через систему блоков [19-20].

При проведении экспериментов применялась математическая теория планирования экспериментов. В качестве факторов варьирования (таблица 1) выбраны факторы, наиболее влияющие на прочность смерзания грунта с рабочим органом: температура наружного воздуха – X_1 (°С) и нагрузка на грунт – X_2 (кг).

Эксперимент проводился в соответствии с математическим планом Бокса-3 (таблица 2). Откликами эксперимента являлись: напряжение сдвига с поверхности без РВС, напряжение сдвига с поверхности с РВС. Усредненные данные результатов эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровень варьирования	Кодированное значение	Температура, ^{0}С X_1	Нагрузка, кг, X_2
Нижний ($X_{i\,min}$)	-1	0	1
Средний ($X_{i\,0}$)	0	-5	2
Верхний ($X_{i\,max}$)	+1	-10	3
Интервал варьирования	-	5	1

Таблица 2

План эксперимента в кодированных и натуральных значениях

№ опыта	Кодированные значения		Натуральные значения	
	X_1	X_2	T, ^{0}C	N, кг
1	+1	-1	-10	1
2	+1	0	-10	2
3	+1	+1	-10	3
4	0	-1	-5	1
5	0	0	-5	2
6	0	+1	-5	3
7	-1	-1	0	1
8	-1	0	0	2
9	-1	+1	0	3

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии свойств обработанного материала для кодированных значений переменных:

1) Напряжение сдвига с поверхности без РВС:

$$Y_1 = 6{,}2 + 5 \cdot x_1 + 2{,}53 \cdot x_2 + 3{,}6 \cdot x_1^2 - 1{,}6 \cdot x_2^2 + 2{,}65 \cdot x_1 \cdot x_2$$

2) Напряжение сдвига с поверхности с РВС:

$$Y_2 = 5{,}2 + 4{,}567 \cdot x_1 + 2{,}666 \cdot x_2 + 2{,}6 \cdot x_1^2 - 0{,}2 \cdot x_2^2 + 2{,}45 \cdot x_1 \cdot x_2$$

Каждое из уравнений модели отражает влияние изменяемых факторов на функцию отклика.

Таблица 3

Отклики эксперимента

№	*T*, ºС	*N*, кг	$У_1$, кПа	$У_2$, кПа
1	-10	1	6.3	5.8
2	-10	2	16.8	13
3	-10	3	18.1	17.9
4	-5	1	4.1	4.4
5	-5	2	5	4.8
6	-5	3	6.37	6.0
7	0	1	3	2
8	0	2	4	3
9	0	3	4.2	4.3

Последним этапом обработки результатов эксперимента является проверка гипотезы адекватности найденной модели. Проверку этой гипотезы производят по *F*-критерию Фишера. Полученные уравнения регрессии проверялись на адекватность методом сравнения двух дисперсий при 5%-ном уровне значимости (т.е при α =0,05 и доверительной вероятности 95%). Результаты проверки свидетельствуют об адекватности полученных уравнений (таблица 4), т.к значение $F_P<F_m$.

Таблица 4

Проверка адекватности уравнений регрессий

Показатели	Расчетный коэффициент Фишера, F_P	Табличный коэффициент Фишера при α=5%, F_m
Усилие срыва на поверхности без РВС	0,707	5,99
Усилие срыва на поверхности с РВС	0,702	5,99

Анализ полученных результатов. Проведенные эксперименты показали, что при нанесении РВС наблюдается снижение адгезии грунта к металлической поверхности рабочего органа землеройной машины в среднем на 18 %.

Анализ графических зависимостей (рис.1-2) показал то, что влияние давления прижатия на адгезию грунта к рабочему органу более значительно при отрицательной температуре, а с увеличением температуры влияние давления прижатия снижается.

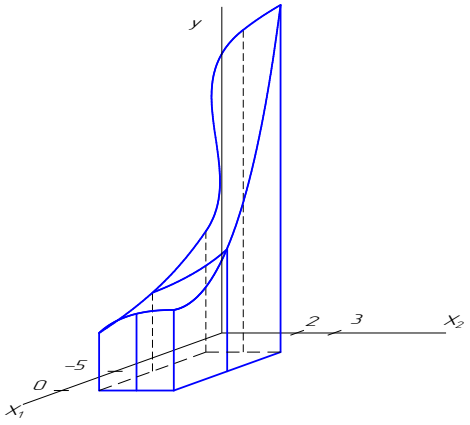


Рис.1. Поверхность отклика без воздействия на имитатор

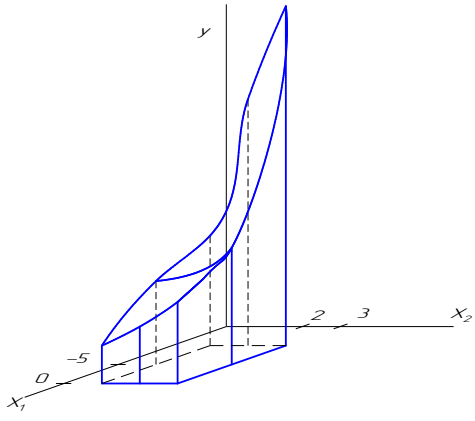


Рис. 2. Поверхность отклика с созданным слоем РВС

Выводы. Результаты экспериментальных исследований использования в качестве промежуточного слоя РВС на адгезию грунтов к металлической поверхности рабочего органа землеройных машин при отрицательной температуре позволяют сделать ряд выводов и практических рекомендаций: применение РВС в качестве профилактического метода создания промежуточного слоя на границе контакта для снижения адгезии грунта к металличе-

ским поверхностям рабочих органов землеройных машин уменьшает значение сдвигающего усилия в среднем на 18 %.

Использование данного метода позволяет обеспечить повышение эффективности работы землеройных машин, разрабатывающих влажный грунт в условиях минусовых температур.

Литература:

1. Wang X L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds), pp 539-545. China Machine Press, Beijing, China.

2. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adgesion of clay soil to steel. // CercetăriAgronomiceîn Moldova Vol. XLV, No. 2 (150) / 2012. P. 21-27.

3. Zadneprovsky R.P. Teoriya treniya skol'zheniya [The theory of sliding friction]. Volgograd: Ofset, 2005. 51p.

4. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. // Journal of Terramechanics 36 (1999) P. 39-49.

5. Zadneprovsky R.P. Working bodies of earthwork and reclamation machines and equipment for the development of soils and materials of high humidity. - M.: Mechanical Engineering, 1992. 176 c.

6. Кузнецов В.Г. Полимерные противоналипающие футеровочные пластины – эффективное средство борьбы с налипанием горных пород на рабочие поверхности экскаваторного и технологического оборудования. // Горный журнал - 2006 № 4. С. 56-57.

7. Зеньков С.А., Плеханов Г.Н., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С. Оборудование для определения влияния жидкостного промежуточного слоя на адгезию грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Вестник Таджикского технического университета. 2014. Т. 2. № 26. С. 28-32.

8. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С., Кожевников А.С. Анализ применения жидкостного промежуточного слоя для снижения адгезии грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 189-195.

9. Зеньков С.А., Жидовкин В.В., Нечаев А.Н. Снижение адгезии грунтов с помощью ремонтно-восстановительных составов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2010. Т. 2. С. 127-131.

10. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Елохин А.В., Дэлэг Д. Перспективы применения гибких нагревательных ленточных элементов для снижения адгезии грунта к рабочим органам ковшового типа // Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 164-167.

11. Червоненко Ю. Геоактиваторы РВС: применение, характеристики и перспективы // Индустрия. – С. Петербург – 2001 - №111(58) – С. 18-19.

12. Chen B., Liu D., Ning S., Cong Q. Research on the reducing adhesion and scouring of soil of lugs by using unsmoothed surface electro-osmosis method. // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, №11(3), 1995. P. 29-33.

13. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Lkhanag D., Battseren I. Definitions of time from the surface soil breakout body work in a high impact. // Scientific transactions № 3/139, Ulaanbaatar, Mongolia, MUST, 2013. – P. 144-146.

14. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Кутимский Г.М. Использование электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Механики XXI веку. 2014. № 13. С. 156-160.

15. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Zarubin D.A. Application of piezoceramic radiators for combating adhesion or soils to excavating part of an earthmoving machine Science and Education: materials of the II international research and practice conference, Vol. I, Munich, December 18th-19th, 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich- Germany, 2012. P. 251-256.

16. Зенков С.А., Ереско С.П. Моделирование процесса копания грунта вибрирующим ковшовым рабочим органом при отрицательной температуре // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 12. С. 44-49.

17. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Баев А.О., Дрюпин П.Ю. Определение мест установки электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 195-202.

18. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение производительности экскаваторов при снижении адгезии грунтов // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук высшей школы РФ. 2010. № 2. С. 191.

19. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Мунц В.В. Стенд для исследования влияния комбинированного воздействия на адгезию грунтов к землеройным машинам // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 15-18.

20. Зеньков С.А., Булаев К.В., Батуро А.А., Диппель Р.А. Стенд для исследования влияния интенсифицирующего воздействия на прочность смерзания грунта с металлической поверхностью рабочего органа // Механики XXI веку. 2005. № 4. С. 44-49.

Use of repair-recovery compositions for reducing the adhesion of soils to working machines of machines

Zenkov S.A.[a], Mineev D.A.[b]

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]mf@brstu.ru,[b]mineev_67@mail.ru

Keywords: repair-recovery composition, adhesion, working body of machines, soil

This article discusses the impact of repair-and-renewal compositions on the process of buildup of the soil working bodies of earthmoving machines. Adhesive forces can be reduced by creating an intermediate layer at the interface between the phases of the system "surface of the working member - the medium to be treated. This layer serves as a screen for intermolecular interaction forces of phases, has a small adhesion and cohesive interaction and has a "lubricating" effect, i.e. Provides the possibility of relative displacement of phase working surfaces. Conducted experimental work in accordance with the mathematical theory of planning of experiments (plan Box 3). After handling of an experiment graphical dependences of effort of shift from a surface without repair and recovery structures and with use of repair and recovery structures were received. The experiments carried out showed that when the RVS is applied, the adhesion of the soil to the metal surface of the digger's working member is reduced by an average of 18%.

УДК 622.271

Фрезерный рабочий орган с поворотными режущими инструментами

Гранкин А.Д.[a]

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия
[a]adgran@mail.ru

Ключевые слова: карьерный комбайн, сложноструктурные месторождения, разработка, горная масса

Применение карьерных комбайнов позволяет отказаться от буровзрывных работ, повысить коэффициент извлечения запасов полезного ископаемого из недр и улучшить его качество за счет селективной выемки. В качестве рабочего органа на карьерных комбайнах обычно используется барабан или шнек, на которых в определенной последовательности установлены режущие инструменты. При переходе с отработки одного типа горной породы к другой на месторождениях, сложенных породами разной крепости, для обеспечения минимальной энергоемкости резания и получения большей производительности целесообразна замена рабочего органа на другой, предназначенный для работы в конкретных условиях или замена резцов. В статье приводятся конструкция и принцип действия фрезерного рабочего органа карьерного комбайна, оборудованного комбинированным режущим инструментом для эффективной разработки сложноструктурных месторождений, сложенных породами разной крепости. Фрезерный рабочий орган оснащен режущими инструментами для разработки крепких и слабых горных пород. Поворот режущих инструментов обеспечивается за счет гидроцилиндров, воздействующих на приводные тяги и рычаги. Предлагаемое усовершенствование позволит повысить эффективность работы карьерных комбайнов.

Введение. Ряд месторождений твердых полезных ископаемых имеют сложную структуру, при которой минеральное сырье перемежается пропластками пустой породы. В на-

стоящее время в мире активно внедряются послойно-полосовые технологии разработки сложноструктурных месторождений с использованием карьерных комбайнов [1-7]. Применение карьерных комбайнов позволяет отказаться от буровзрывных работ, повысить коэффициент извлечения запасов полезного ископаемого из недр и улучшить его качество за счет селективной выемки [5].

В качестве рабочего органа на карьерных комбайнах обычно используется барабан или шнек, на которых в определенной последовательности установлены режущие инструменты. В настоящее карьерные комбайны применяются при разработке месторождений угля, гипса, мергеля, известняков, бокситов, фосфоритов и других полезных ископаемых, также они разрабатывают вскрышные и вмещающие породы, сложенные песчаниками, сланцами, алевролитами, аргиллитами, мерзлыми мелкозернистыми породами [8-9]. В зависимости от физико-механических характеристик, разрабатываемых горных пород, тип и марки породоразрушающих инструментов могут изменяться с целью обеспечения наиболее эффективного процесса резания. Карьерные комбайны оснащаются как стандартным рабочим органом, предназначенным для разработки пород средней крепости, так и специальными рабочими органами, предназначенными для работы в легких или тяжелых условиях [10]. Например, так называемые «угольные» специальные рабочие органы оснащаются породоразрушающим инструментом (резцами) с увеличенным вылетом для обеспечения большего выхода крупных фракций [11].

Режущие породные инструменты. Резание слабых по крепости горных пород (1…2 единицы по шкале М.М. Протодьяконова) ведется, как правило, клиновидными резцами выемочных машин. Механизм разрушения породы такими резцами хорошо изучен. При движении клиновидного резца в породе перед его лобовой поверхностью образуется, так называемое, уплотненное ядро, которое создает давление на вышележащий слой породы, в результате чего возникает предельное состояние, когда сопротивление вышележащего слоя становится меньше давления со стороны уплотненного ядра и происходит отделение элемента стружки. Для работы на крепких породах такие клиновидные резцы с достаточно широкой режущей кромкой непригодны, поскольку их кромки отгибаются, сминаются и быстро изнашиваются. Для пород с крепостью больше 2…3 единиц по шкале М.М. Протодьяконова целесообразно применять резцы с округлыми сферическими наконечниками, при работе таких резцов перед сферическим наконечником также формируется уплотненное ядро, но его тело направлено вниз в сторону массива породы [12]. Уплотненное ядро давит на породу вперед, вниз и в боковые стороны, что вызывает отрыв части породы с боковых сторон и спереди по направлению движения рабочего органа. Такие рабочие органы не целесообразно применять для резания слабых пород, поскольку энергоемкость процесса становится значительно выше, чем при резании клиновидными резцами.

При переходе комбайна с отработки одного типа горной породы к другой на сложноструктурных месторождениях сложенных породами разной крепости для обеспечения минимальной энергоемкости резания горных пород и получения большей производительности целесообразна замена рабочего органа на другой, предназначенный для работы в конкретных условиях (легких, средних или тяжелых) или замена резцов. Однако данная замена, во-первых, не должна вести к значительным по времени простоям машины. Во-вторых, использование рабочего органа при работе с породами большей крепости, чем та на которую он рассчитан, приводит к быстрому износу и поломкам резцов. В-третьих, при использовании рабочего органа на заведомо менее крепких породах, чем те для которых он приспособлен, приводит к неполному использованию технических возможностей комбайна по производительности и переизмельчению горной массы.

Результаты исследований. В Институте горного дела ДВО РАН разработан способ освоения сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых и фрезерный рабочий орган карьерного комбайна для осуществления данного способа. Конструкция фрезерного рабочего органа карьерного комбайна, оборудованного комбинированным режущим

инструментом для более эффективной разработки сложноструктурных месторождений, сложенных породами разной крепости представлена на рисунке 1.

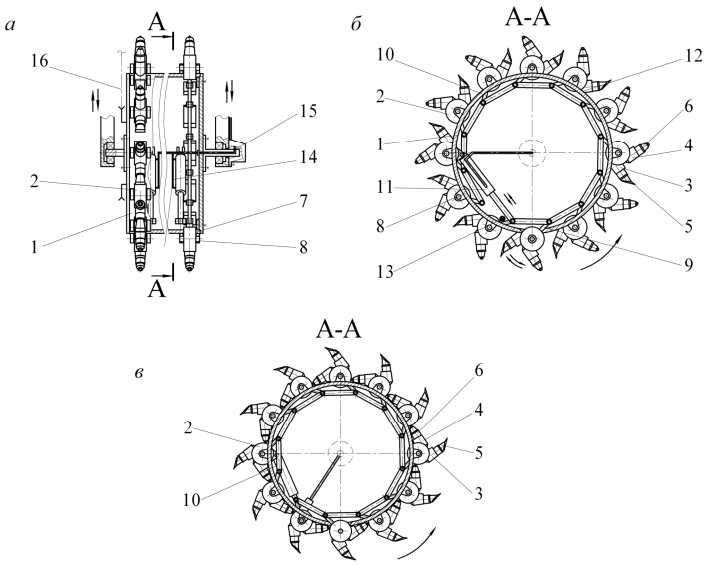


Рис. 1. Схема фрезерного рабочего органа с поворотными режущими инструментами:
а – вид спереди; *б* – резцы рабочего органа в положении для разработки крепких горных пород;
в – резцы рабочего органа в положении для разработки горных пород малой крепости

Фрезерный рабочий орган карьерного комбайна представляет собой барабан 1 с подвижно установленными на нем ступицами 2, на каждой из которых жестко закреплены по два резцедержателя 3 и 4 комбинированного режущего инструмента. В резцедержатель 3 устанавливается режущий инструмент (резец) 5, например клиновой резец, для разрушения породы малой крепости, а в резцедержатель 4 резец 6 со сферическим наконечником для разрушения породы большей крепости сложностуктурного месторождения. Ступицы 2 могут поворачиваться в пазах 7 барабана 1 относительно осей 8 и через поворотные рычаги 9 и тяги 10 взаимодействуют с поворотными гидроцилиндрами 11, расположенными внутри барабана 1. Резцедержатель 3 имеет упорный торец 12 для предохранения рычагов 9, тяг 10 и штоков гидроцилиндров 11 от максимальных усилий, возникающих на резцах 6 при разрушении крепких пород. Поворотные рычаги 9 оснащены фиксаторами 13, которые замыкаются при работе резцов 5 для снятия нагрузок с тяг 10 и штоков поворотных гидроцилиндров 11. Гидравлическая жидкость для управления поворотными гидроцилиндрами 11 и фиксаторами 13 подается по каналам 14 через коллектор 15. Рабочий орган установлен в подъемных опорах и приводится во вращение приводом 16.

Работа фрезерного рабочего органа, оснащенного комбинированным режущим инструментом, при отработке солжноструктурного месторождения ведется следующим образом.

При разработке пород малой крепости штоки поворотных гидроцилиндров 11 втянуты (рис. 1, в), и отработка массива происходит с помощью резцов 5. При приближении рабочего органа комбайна к крепкому слою породы комбайн останавливается, после чего рабочий орган приподнимается. Поворотные гидроцилиндры 11 через тяги 10, поворотные рычаги 9 и ступицы 2 производят установку резцов 6 в рабочее положение (рис. 1, а, б). Фрезерный рабочий орган комбайна опускается и начинает разрушение крепкого массива породы, при этом упорные торцы 12 резцедержателей 3 прижимаются к барабану 1 и воспринимают усилия, передающиеся на ступицы 2 со стороны резцов 6. В случае приближения слоя менее крепких пород, комбайн вновь останавливается, рабочий орган приподнимается, штоки поворотных гидроцилиндров 11 втягиваются и через тяги 10, поворотные рычаги 9 и ступицы 2 производится установка резцов 5 в рабочее положение, при этом резцы 6 прижимаются к барабану 1 (рис. в). Одновременно поворотные рычаги 9 стопорятся фиксаторами 13 с целью снижения нагрузок на тяги 10 и поворотные гидроцилиндры 11, возникающих при разработке массива. Таким образом, карьерный комбайн послойно отрабатывает месторождение, со-

стоящее из чередующихся прослоев крепких и менее крепких, но более пластичных горных пород.

Выводы. Предлагаемая конструкция фрезерного рабочего органа карьерного комбайна, оснащенного комбинированным режущим инструментом, позволит резко повысить эффективность разработки месторождений твердых полезных ископаемых сложенных горными породами различной прочности.

Литература:

1. Шемякин С.А., Чебан А.Ю., Клигунов Е.С. Повышение эффективности послойно-полосовой технологии открытых горных работ с применением выемочных машин фрезерного типа и скреперов // Горный журнал. 2003. №4-5. С. 48-50.
2. Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Комбайны Wirtgen Surface Miner на открытых горных работах: История развития, масштабы применения и перспективы расширения // Горная промышленность. 2009. №2. С. 54-57.
3. Панкевич Ю.Б., Шимм Б., Дженге П. Опыт применения горных комбайнов Wirtgen Surface Miner на угольных разрезах мира // Горная промышленность. 1999. №3. С. 46-52.
4. Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Wirtgen Surface Miner в Индии. Опыт селективной разработки угольных месторождений // Горная промышленность. 2003. №4. С. 40-47.
5. Чебан А.Ю. К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 3. С. 145-148.
6. Шемякин С.А., Матвеев Д.Н., Чебан А.Ю. Экономическое обоснование эффективности безвзрывной селективной выемки полезного ископаемого и вмещающих пород с использованием технико-технологических комплексов на основе фрезерных комбайнов // Горный журнал. 2015. №2. С. 43-46.
7. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus / Russia. // Zement-Kalk-Gips Int. 2014. 67, № 10, p. 18.
8. Чебан А.Ю. Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2. С. 159-163.
9. Чебан А.Ю. Классификация конструкций карьерных комбайнов // Недропользование XXI век. 2015. №5 (55). С. 64-69.
10. Исполнительный орган горного комбайна. Буткин В.Д., Косолапов А.И., Тодинов А.М., Шварцкопф А.В. Патент на изобретение RUS 2209975 17.05.2002.
11. Ицков Я.Ю., Юдин С.В., Леоненко А.Н., Майнагашев А.С., Пихлер М., Панкевич Ю.Б. Применение карьерного комбайна Wirtgen 2200SM при разработке Восточно-Бейского каменноугольного месторождения // Горная промышленность. 2002. №2. С. 43-45.
12. Чебан А.Ю. Экспериментальные исследования процесса разрушения породы резцами фрезерного рабочего органа // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. №1. С. 125-128.

Milling tool with rotary cutting tools

Grankin A.D.[a]

Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a]adgran@mail.ru

Keywords: career combine, complex deposits, development, rock mass.

The use of quarry combines allows to abandon drilling and blasting operations, to increase the extraction factor of mineral resources from the bowels and to improve its quality through selective excavation. As a working organ on a mining machine, a drum or auger is usually used, in which cutting tools are installed in a certain sequence. When transitioning from mining one type of rock to another, in fields composed of rocks of different strengths, to ensure minimum energy consumption of cutting and obtaining more productivity, it is expedient to replace the working member with another one, designed to work in specific conditions or to replace incisors. The article describes the design and operation principle of a milling working body of a mining combine equipped with a combined cutting tool for the effective development of complex-structure deposits composed of rocks of different strengths. The milling tool is equipped with cutting tools for the development of strong and weak rocks. The rotation of cutting tools is provided by hydraulic cylinders acting on drive rods and levers. The proposed improvement will increase the efficiency of the operation of mine harvesters.

УДК 621.879.3

Обзор нагревательных элементов в качестве средства для борьбы с адгезией грунта в условиях отрицательных температур

Зеньков С.А.[a], Балахонов Н.А.[b], Дрюпин П.Ю.[c]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mf@brstu.ru, [b]balaxon-off@mail.ru

Ключевые слова: Нагревательный элемент, адгезия, связный грунт, землеройные машины, напряжение сдвига, однофакторные уравнения, нагрев пластины

Основной причиной снижения производительности землеройных машин является увеличение адгезии и трения при разработке влажных связных грунтов в условиях отрицательных температур. Данная проблема существует как в России, так и за рубежом. При разработке зимой мерзлых глинистых и мокрых грунтов, разрыхленных на куски, наполнение ковша и скорость работы экскаватора значительно меньше, чем в летних условиях. Мокрый грунт, соприкасаясь с охлажденными стенками ковша, быстро к ним примерзает, уменьшается полезный объем ковша и затрудняется выгрузка. Проведен обзорный анализ саморегулирующихся нагревательных элементов. Рассмотрены три нагревательных элемента ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2, как возможные варианты для применения непосредственно на ковше экскаватора для ослабления адгезионных связей путём нагрева рабочей поверхности машины. Представлены результаты экспериментальных исследований, представлены однофакторные уравнения регрессии температуры нагрева пластины для каждого из нагревательных элементов, построены температурно-временные характеристики трёх нагревательных элементов, произведен сравнительный анализ трёх нагревательных элементов ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2.

Введение. Существующие методы снижения трения и прилипания можно разделить на четыре группы. Первый метод включает в себя создание промежуточного слоя на границе контакта, который может служить защитным экраном для молекулярного взаимодействия фаз и должен обладать адгезионным взаимодействием. Вторая группа включает в себя методы, способствующие ослаблению адгезионных связей за счет внешнего воздействия. Третий метод основан на конструктивно-технологических и механических способах. Четвертая группа – это комбинирование двух или более методов для снижения адгезии [1 – 20]. В данной статье рассматривается метод внешнего воздействия, инструментами которого являются нагревательные элементы в виде греющих саморегулирующихся нагревательных кабелей марок ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2.

Основная часть. Рассмотрим применение нагревательных элементов для ослабления адгезионных связей мёрзлого грунта с контактной зоной рабочей металлической поверхности. Нагревательные кабели – специфический вид кабельных изделий, преобразующих электрическую энергию в тепловую в целях нагрева и выполняющих функцию приемника электрической энергии, а не передающей линии. Нагревательные кабели значительно отличаются от обычных кабелей и проводов, назначение которых передавать электрическую энергию с наименьшими потерями и с незначительным падением напряжения не длине линии (обычно не более 5%) [21].

Нагревательный кабель используется в виде нагревательных секций, т.е. отрезков определенной длины, причем на этой длине происходит полное падение приложенного напряжения. Следовательно, нагревательную секцию следует рассматривать как обычный приемник электрической энергии (как один из видов электрических нагревательных элементов). Отрицательный для обычных кабелей эффект рассеяния части передаваемой энергии в виде тепла используется как полезный в нагревательных кабелях. Причем преобразование электрической энергии в тепло происходит самым оптимальным и экономичным способом. Преобразование полное, бесшумное, без использования дополнительных веществ (топлива, окислителя).

На рис. 1 представлена схема принципа работы саморегулирующихся нагревательных элементов.

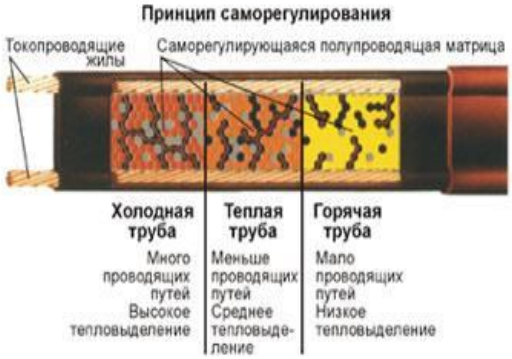


Рис. 1. Принцип саморегулирования нагрева греющих кабелей

Работа саморегулирующегося нагревательного кабеля основана на простом свойстве проводника электрического тока: при нагревании увеличивается его сопротивление, а чем выше сопротивление, тем меньше сила тока, а, следовательно, и затрачиваемая мощность. Участок кабеля, который находится в более холодном месте, имеет меньшее сопротивление, через нагревательную матрицу в этом участке протекает большой ток, что приводит к большему нагреву кабеля иболее интенсивному обогреву трубы. Там где температура выше, сопротивление матрицы больше и ток, протекающий через неё меньше. Таким образом, при включении саморегулирующегося кабеля у замерзающей водопроводной трубы, он включается на полную мощность, а по мере прогрева трубы, его мощность постепенно увеличивается [22].

Сам по себе греющий кабель не выключается при достижении нужной температуры обогреваемой трубы, он продолжает работать постоянно, просто с меньшей мощностью. Например, кабель используется на участке водопроводной трубы на вводе в дом в зимний период, и его задача поддерживать температуру трубы +5 градусов, чтобы предотвратить замерзание. Саморегулирующийся кабель не будет отключать обогрев при температуре +5 градусов и выше, и не будет сам включаться при падении температуры ниже +5, он будет работать постоянно, просто с разной интенсивностью.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики нагревательных элементов трёх марок: мощность нагревательного элемента, температура нагрева на открытом воздухе, напряжения питания и длина кабеля, также приведена область применения нагревательных элементов для каждой из трёх марок.

Таблица 1

Характеристики нагревательных элементов

Характеристики	**Наименование греющих кабелей**		
	ТМ-40	ТМ-60	SRL 30-2
Мощность, Вт/м	40	60	30
Температура нагрева на воздухе, С	95	115	85
Напряжение питания, В	220	220	220-240
Длина кабеля, м	6	6	6
Область применения			
ТМ-40	Обогрев бетона, в холодильной промышленности		
ТМ-60	Обогрев бетона, в холодильной промышленности		
SRL 30-2	Обогрев водостоков и кровли, Обогрев водопровода, Обогрев труб и трубопроводов, Обогрев резервуаров и емкостей		

Проведён анализ нагревательных кабелей марок ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2 для выявления наиболее эффективного греющего элемента с максимальной температурой нагрева при

продолжительности работы t=10 мин. В качестве имитатора рабочей поверхности был использован специальный сдвиговой стенд. Эксперимент проводился в помещении, при температуре 20 град.

Нагрев металлической пластины с помощью нагревательного элемента проводился 10 мин, значения температуры нагрева в зависимости от времени контакта замерялись в значениях 2, 4, 6, 8 и 10 минут.

Результаты проведенного эксперимента показаны в таблице 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Наименование кабеля	**Время нагрева пластины, мин.**				
	2	4	6	8	10
	Температура нагрева пластины, в зависимости от продолжительности нагрева, ˚С				
ТМ-40	15	16	17	19	20
ТМ-60	22	31	39	46	51
SRL 30-2	10	12	14	15	17

На рисунке 2 изображена общая температурно-временная характеристика нагревательных элементов ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2.

Рис. 2. Общая температурно-временная характеристика нагревательных элементов

Произведена математическая обработка результатов эксперимента. Математическая обработка полученных результатов проводилась при помощи программы MODEL для однофакторных зависимостей. Для получения однофакторных уравнений регрессии использовалась функция $y = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^2$.

В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии для трёх марок нагревательных кабелей ТМ-40, ТМ-60 и SRL 30-2.

Полученные однофакторные уравнения показаны в таблице 3.

Таблица 3

Однофакторные уравнения температуры нагрева пластины

Температурно-временная характеристика кабеля ТМ-40 при +20 град	
Температура нагрева пластины, ˚С	$Y = 14 + 0{,}435714 \cdot x + 0{,}017857 \cdot x^2$
Температурно-временная характеристика кабеля SRL 30-2 при +20 град	
Температура нагрева пластины, ˚С	$Y = 8 + 1{,}064286 \cdot x - 0{,}017857 \cdot x^2$
Температурно-временная характеристика кабеля ТМ-60 при + 20 град	
Температура нагрева пластины, ˚С	$Y = 14{,}066667 + 4{,}642424 \cdot x - 0{,}090909 \cdot x^2$

С помощью программы MicrosoftExcel, на основе полученных однофакторных уравнений в таблице 3 получили квазиоднофакторные зависимости при фиксированном значении времени нагрева пластины. Полученные зависимости изображены на рис. 3.

а) Греющий кабель ТМ-40

б) Греющий кабель ТМ-60

в) Греющий кабель SRL 30-2

Рис. 3. Зависимости температуры пластины от времени контакта нагрева

При контакте влажных дисперсных масс с нагретой поверхностью происходит ряд процессов, которые могут привести к сложной зависимости адгезии от температуры. Повышение температуры приводит к переходу прочносвязанной грунтовой влаги в менее связанную и свободную воду. Уменьшение вязкости и поверхностного натяжения воды с увеличением температуры снижает капиллярные силы, которые в ряде случаев оказывают влияние на адгезионную составляющую силы трения. Длительный контакт при повышенной температуре приводит к интенсивному парообразованию и осушению зоны контакта. Высушивание влажных масс, как правило, сопровождается их значительной усадкой, что, с одной стороны, приводит к разрушению адгезионных связей и согласуется с предыдущими исследованиями [23].

Заключение. Результаты экспериментальных исследований влияния нагрева контактной зоны на адгезию грунтов к металлической поверхности при отрицательной температуре позволяют сделать ряд выводов и практических рекомендаций. Проведен обзорный анализ по использованию саморегулирующихся нагревательных элементов в качестве борьбы с адгезией грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин. Произведена математическая обработка однофакторных зависимостей по результатам экспериментальных данных для получения уравнений регрессии, построены квазиоднофакторные зависимости.

Наиболее эффективную работу среди нагревательных элементов показал греющий кабель марки ТМ-60. По результатам эксперимента, на каждом отрезке времени нагревательный элемент ТМ-60 показал себя эффективней греющего кабеля ТМ-40 в 1,5…2,6 раза лучше. По сравнению с греющим кабелем SRL 30-2, ТМ-60 оказался наиболее эффективней в 2,2…3 раза.

Литература:

1. Wang X L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds), pp 539-545. China Machine Press, Beijing, China.

2. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adgesion of clay soil to steel. // Cercetări Agronomiceîn Moldova Vol. XLV, No. 2 (150) / 2012. P. 21-27.

3. Zadneprovsky R.P. Teoriya treniya skol'zheniya [The theory of sliding friction]. Volgograd: Ofset, 2005. 51p.

4. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. // Journal of Terramechanics 36 (1999) P. 39-49.

5. Zadneprovsky R.P. Working bodies of earthwork and reclamation machines and equipment for the development of soils and materials of high humidity. - M.: Mechanical Engineering, 1992. 176 c.

6. Кузнецов В.Г. Полимерные противоналипающие футеровочные пластины – эффективное средство борьбы с налипанием горных пород на рабочие поверхности экскаваторного и технологического оборудования. // Горный журнал - 2006 № 4. С. 56-57.

7. Зеньков С.А., Плеханов Г.Н., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С. Оборудование для определения влияния жидкостного промежуточного слоя на адгезию грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Вестник Таджикского технического университета. 2014. Т. 2. № 26. С. 28-32.

8. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С., Кожевников А.С. Анализ применения жидкостного промежуточного слоя для снижения адгезии грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 189-195.

9. Зеньков С.А., Жидовкин В.В., Нечаев А.Н. Снижение адгезии грунтов с помощью ремонтно-восстановительных составов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2010. Т. 2. С. 127-131.

10. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Елохин А.В., Дэлэг Д. Перспективы применения гибких нагревательных ленточных элементов для снижения адгезии грунта к рабочим органам ковшового типа // Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 164-167.

11. ЧервоненкоЮ. ГеоактиваторыРВС: применение, характеристики и перспективы // Индустрия. – С. Петербург – 2001 - №111(58) – С. 18-19.

12. Chen B., Liu D., Ning S., Cong Q. Research on the reducing adhesion and scouring of soil of lugs by using unsmoothed surface electro-osmosis method. // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, №11(3), 1995. P. 29-33.

13. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Lkhanag D., Battseren I. Definitions of time from the surface soil breakout body work in a high impact. // Scientific transactions № 3/139, Ulaanbaatar, Mongolia, MUST, 2013. – P. 144-146.

14. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Кутимский Г.М. Использование электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Механики XXI веку. 2014. № 13. С. 156-160.

15. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Zarubin D.A. Application of piezoceramic radiators for combating adhesion or soils to excavating part of an earthmoving machine Science and Education: materials of the II international research and practice conference, Vol. I, Munich, December 18th-19th , 2012 / publishing office Vela VerlagWaldkraiburg – Munich- Germany, 2012. P. 251-256.

16. Зеньков С.А., Ереско С.П. Моделирование процесса копания грунта вибрирующим ковшовым рабочим органом при отрицательной температуре // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 12. С. 44-49.

17. Зеньков С.А., Кожевников А.С., Баев А.О., Дрюпин П.Ю. Определение мест установки электронагревательных гибких ленточных элементов для борьбы с намерзанием грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 195-202.

18. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение производительности экскаваторов при снижении адгезии грунтов // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук высшей школы РФ. 2010. № 2. С. 191.

19. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Мунц В.В. Стенд для исследования влияния комбинированноговоздействия на адгезию грунтов к землеройным машинам // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 15-18.

20. Зеньков С.А., Булаев К.В., Батуро А.А., Диппель Р.А. Стенд для исследования влияния интенсифицирующего воздействия на прочность смерзания грунта с металлической поверхностью рабочего органа // Механики XXI веку. 2005. № 4. С. 44-49.

21. Нагревательные кабели: виды и области применения [Электронный ресурс]: информация и обучающие материалы для начинающих электриков. Режим доступа: http://electrik.info/main/news/117-nagrevatelnye-kabeli-vidy-i-oblasti-primeneniya.html

22. Кабель для обогрева: круглогодичная работа трубопроводов [Электронный ресурс]: информация и материалы для эффективного отопления квартиры и частного дома. Режим доступа: http://teploguru.ru/teplyj-pol/elektricheskij/kabel-dlya-obogreva.html

23. Заднепровский Р.П. Повышение производительности строительных и дорожных машин при разработке влажных грунтов и материалов. М.: ЦНИИТЭстройдормаш. 1984. 44 с.

Overview of heating elements as a means for combating soil adhesion under conditions of negative temperatures

Zenkov S.A.[a], Balahonov N.A.[b], Dryupin P.Yu.[c]

Bratsk State University,40 Makarenko St.,Bratsk,Russia
[a]mf@brstu.ru, [b]balaxon-off@mail.ru

Keywords: Heating element, adhesion, cohesive soil, earth-moving machines, shear stress, single-factor equations, plate heating

The main reason for the decrease in the productivity of excavating machines is the increase in adhesion and friction in the development of wet cohesive soils under conditions of negative temperatures. This problem exists both in Russia and abroad. In the development of frozen clay and wet soils in winter, loosened to pieces, filling the bucket and the speed of the excavator is much less than in summer conditions. Wet soil, in contact with the cooled walls of the bucket, quickly hears to them, reduces the useful volume of the bucket and makes it difficult to unload. An overview analysis of self-regulating heating elements has been carried out. Three heating elements TM-40, TM-60 and SRL 30-2 are considered as possible variants for application directly on the excavator bucket for weakening of adhesive bonds by heating the working surface of the machine. The results of experimental studies are presented, single-factor regression equations for the plate heating temperature for each of the heating elements are presented, the temperature-time characteristics of the three heating elements are constructed, and the three heating elements TM-40, TM-60 and SRL 30-2 arecompared.

УДК 622.271

Техника для открыто-подземной разработки твердых полезных ископаемых

Мороз Д.Р.[a]

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия
[a]morozik.dmitriy75@gmail.com

Ключевые слова: крутопадающие рудные тела, комплекс глубокой разработки, горная масса

Основные объемы минеральных ресурсов во всем мире добываются открытым способом, при этом удельный вес открытой добычи по многим полезным ископаемым продолжает возрастать. В связи с постепенным ухудшением горно-геологических условий отработки месторождений к карьерному оборудованию предъявляются все более высокие требования. При открытой разработке значительное количество минеральных запасов остается за техническими границами карьеров и в целиках различного назначения, отработка которых традиционными способами экономически не целесообразна или технически невозможна, доработка данных относительно небольших запасов подземным способом также нецелесообразна. Известны комплексы глубокой разработки, позволяющие вести выемку горизонтальных и наклонных пластов полезных ископаемых. Важной технической задачей в настоящее время является создание горного оборудования позволяющего с минимальными затратами разрабатывать с поверхности крутопадающие рудные тела. Открыто-подземная разработка рудных тел позволяет значительно снизить коэффициент вскрыши, в результате чего себестоимость добычи полезного ископаемого уменьшается, а рентабельность горного производства возрастет.

Введение. Основные объемы минеральных ресурсов во всем мире добываются открытым способом, при этом удельный вес открытой добычи по многим полезным ископаемым продолжает возрастать. При этом крупных глубина карьеров увеличивается. В связи с постепенным ухудшением горно-геологических условий отработки месторождений к карьерному оборудованию предъявляются все более высокие требования [1]. Для обеспечения селективной выемки полезных ископаемых, повышения устойчивости бортов карьеров, ужесточения требований безопасности ряд предприятий отказываются от буровзрывной подготовки пород к выемке и переходят на механическое рыхление. В последние десятилетия ведется интенсивное совершенствование горных машин и оборудования, создаются новые образцы. Большое развитие получила техника для безвзрывной выемки прочных горных пород. Карьерные комбайны и фрезерные машины, оборудованные фрезерным рабочим органом, разрабатывают не только плотные и полускальные, но и отдельные скальные породы [2–5], с обеспечением высокой селекции пород. При этом, единичная мощность горного оборудования, задействованного на открытых горных работах продолжает увеличиваться [6]. Во многих случаях механическое рыхление оказывается экономически более выгодным, чем рыхление взрывом.

Постановка проблемы. При открытой разработке месторождений значительное количество минеральных запасов остается за техническими границами карьеров и в целиках различного назначения, отработка которых традиционными способами и экономически не целесообразна или технически невозможна, доработка данных относительно небольших запасов подземным способом также нецелесообразна. Отдельным рядом стоят маломасштабные месторождения, которые зачастую обладают высоколиквидными запасами минерального сырья в крутопадающих рудных телах расположенных на небольшой глубине, однако разработка таких месторождений по традиционным технологиям также зачастую оказывается нерентабельной. Поэтому важной технической задачей в настоящее время является создание горного оборудования позволяющего с минимальными затратами разрабатывать с поверхности маломасштабные крутопадающие месторождения и дорабатывать рудные тела (включая крутопадающие) средних и крупных карьеров.

Результаты исследований. В настоящее время созданы технологические решения, позволяющие дорабатывать горизонтальные и наклонные пласты полезных ископаемых [7-8]. Так в угольной промышленности США в 1950-х годах появилась так называемая «прибортовая отработка угля», позволяющая разрабатывать залегающие на небольшую глубину и находящиеся за предельными контурами карьера пласты без выполнения дополнительных вскрышных работ. Для отработки таких пластов применялись шнекобуровые агрегаты, оснащённые горизонтальными шнеками большого диаметра. У откоса уступа с обнажённым выходом угольно пласта устанавливалась шнекобуровая машина так, чтобы ось шнека совпадала с линией падения (восстания) пласта. За счёт углубления вращающегося бурового става в забой, шнек выдавал разрушенный уголь из скважины в приёмный бункер машины, откуда по конвейеру тот попадал в транспортное средство, либо штабель на площадке уступа. Между соседними скважинами оставлялись целики шириной 0,3…0,6м. Если на начальном этапе развития данной технологии глубина бурения не превышала 60м, то через 30-40лет глубина бурения достигала 200м и более. В настоящее время по данной технологии отрабатываются пласты угля мощностью от 0,4 до 3м, залегающие под углом падения 0-30°. Применяются одно-, двух- и трёх шпиндельные агрегаты, способные бурить одновременно одну, две и три скважины соответственно.

В конце 1970-х годов началось создание комплексов прибортовой добычи угля нового технологического уровня, развивающие технологии шнекобуровой выемки, с использованием подземных проходческих комбайнов. Первые опытные образцы The Thin Seam Miner (разработчика тонких пластов) были выпущены компанией Dieseko (Голландия). На основной раме машины установлены: механизм балки-толкателя с двумя мощными гидроцилиндрами для подачи режущего модуля на угольный забой и извлечения его в исходное положение, вращатель шнекового конвейера и загрузочный стол шнекового конвейера. Шнековый конвейер состоит из коробчатых секций длиной по 6,1м. Внутри короба каждой секции раз-

мещены два противоположно вращающихся шнека, транспортирующих уголь от режущего модуля к разгрузочному узлу комплекса.

Американская компания Super Highwall Miner (SHM) с учетом опыта предшественников и произведенных улучшений конструкции комплексов, удалось наладить производство комплексов разработки тонких пластов в промышленных масштабах. После многочисленных объединений и поглощений компания SHM была приобретена компанией CATERPILLAR и далее стала функционировать под брендом CAT–SHM, под которым, в настоящее время, и выпускается данное оборудование (рис. 1.).

Рис. 1. Комплекс разработки тонких пластов CAT-SHM модель 2011г

За прошедшие десятилетия первоначальная конструкция комплекса The Thin Seam Miner претерпела серьезные изменения, постоянно модифицировалась и продолжает модифицироваться исходя из наработанного опыта. Наиболее важными модификациями являются: разгрузка угля через хвостовой конвейер; механизированный загрузочный стол секций шнекового конвейера; горизонтальное расположение блока автоматизированного управления; применяется новая конструкция соединения и крепления между собой секций шнекового конвейера; автоматическая система навигации режущего органа.

Разработка месторождений с применением комплексов глубокой разработки пластов ведется в США, России, Индии, Индонезии, Южной Африке, Китае и Австралии. В Россию было поставлено четыре комплекса SHM-№ 28, 29, 34, 56. В России открыто-подземный способ добычи угля применяется на ряде разрезов. Так в Заполярье на разрезе «Юньягинский» применяется бурошнековая технология добычи угля [9]. Разрез Распадский является первым российским разрезом, где для добычи применяются современные методы выемки угля из недр, по безлюдной технологии, с помощью комплекса глубокой разработки пластов американской фирмы SHM.

Это предприятие комбинирует два способа добычи угля – традиционный открытый и глубокую разработку пластов, используя самую передовую технику ведущих мировых производителей. Разрез Распадский работает в сложных горно-геологических условиях на маломощных пластах. Данные комплексы задействованы также при разработке Элегестского каменноугольного месторождения [10]. Согласно проекту, общий объём добычи с применением технологии КГРП 481,4 тыс.т. Причём замена способа добычи позволила снизить средний коэффициент вскрыши с 18,8 $м^3$/т при открытом способе разработки до 5,08 $м^3$/т при применении новой технологии. Анализируется возможность применения комплекса глубокой разработки в условиях Талдинского угольного разреза [11].

Недостатками известной конструкции комплексов глубокой разработки пластов являются: невозможность разработки пластов с углом падения более $18…20^0$, исходя из условий транспортировки отбитой породы по ленточному конвейеру комплекса; громоздкость комплексов, что весьма затруднит их перемещение к маломасштабным месторождениям, расположенных в отдаленных труднодоступных условиях.

В Институте горного дела ДВО РАН разработаны технологии по освоению месторождений твердых полезных ископаемых с применением машин с фрезерными рабочими органами, а также предложены усовершенствования для ряда горных машин [12–14]. В настоящее время в институте разрабатывается конструкция комплекса глубокой разработки крутопадающих маломасштабных месторождений. Комплекс будет включать колесное шасси повышенной проходимости, консольную телескопическую стрелу с фрезерным исполнительным органом, вакуумную систему пневмотранспортирования горной массы из забоя в кузов автосамосвала и другое оборудование. Комплекс глубокой разработки предназначен для освоения маломасштабных крутопадающих месторождений, а также для доработки крутопадающих рудных тел на крупных карьерах, дальнейшая разработка которых традиционными способами нецелесообразна.

Выводы. Открыто-подземная разработка рудных тел позволяет значительно снизить коэффициент вскрыши, в результате чего себестоимость добычи полезного ископаемого будет снижена, а рентабельность горного производства возрастет. В будущем удачный опыт применения известных и проектируемых комплексов глубокой разработки способен дать толчок к освоению ранее неперспективных маломасштабных рудных и нерудных месторождений и повысить коэффициент извлечения на уже существующих предприятиях.

Литература:

1. The titans of open-pit mines. Zement-Kalk-Gips Int. 2014. 67, № 10, c.
2. Чебан А.Ю. Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2. С. 159-163.
3. Чебан А.Ю. Скрепер с комбинированной интенсификацией загрузки ковша // Механизация строительства. 2015. №4. С. 4-6.
4. Шемякин, С.А. Технико-технологические решения разработки мерзлых и крепких пород в горном деле и строительстве: моногр. / С. А. Шемякин, Ю. А. Гамоля, А. Ю. Чебан. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. -188 с.
5. Чебан А.Ю. Применение фрезерных комбайнов в строительстве и на добыче строительных материалов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. №3. С. 105-108.
6. Special equipment for quarry operations. Zement-Kalk-Gips Int. 2014. 67, № 10, c. 12.
7. Смирнов С.А., Печенегов О.Ю., Казаков А.С. Результаты опытно-промышленных работ по доработке запасов каменноугольных месторождений за техническими границами разрезов комплексами глубокой разработки пластов // Рациональное освоение недр. 2015. №4. С. 58-62.
8. Применение системы HIGHWALL для выемки угля с уступа разреза (краткий обзор состояния работ в США и Австралии) // Открытые горные работы. 2000. №2. С. 54-56.
9. Вовк А.И., Каплан А.В., Лейдерман Л.П., Пикалов В.А. Развитие добычи коксующихся углей открытым способом в условиях Заполярья // Рациональное освоение недр. 2013. №5. С. 50-54.
10. Задавин Г.Д., Лейдерман Л.П. Освоение Элегестского каменноугольного месторождения – основа создания новой сырьевой базы коксующихся углей // Рациональное освоение недр. 2012. №2. С. 38-44.
11. Чаплыгин В.В., Малофеев Д.В. Использование комплекса глубокой разработки пластов в условиях «Ерунаковского поля» филиала УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» // Маркшейдерия и недропользование. 2016. №5. С. 49-52.
12. Чебан А.Ю. Совершенствование безвзрывных циклично-поточных технологий добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 5-9.
13. Чебан А.Ю. Совершенствование технологий открытой разработки месторождений с использованием карьерных комбайнов и отвалообразователей // Записки горного института. 2015. Т. 214. С. 23-27.
14. Чебан А.Ю., Шемякин С.А. Параметры скреперов для внедрения послойно-полосовые технологии открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Т. 10. №12. С. 285-294.

Technique for open-underground mining of solid minerals

Moroz D.R.[a]

Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a]morozik.dmitriy75@gmail.com

Keywords: steeply falling ore bodies, complex of deep mining, rock mass

The main volumes of mineral resources around the world are produced by the open method, while the share of open production in many minerals continues to increase. In connection with the gradual deterioration of the mining and geological conditions of mining deposits to the quarry equipment are increasingly demanding. With open development, a significant amount of mineral reserves remain outside the technical boundaries of quarries and in various purposes, the development of which is not economically feasible or technically feasible by traditional methods, the improvement of data on relatively small stocks by underground means is also not expedient. Complexes of deep development are known that allow excavation of horizontal and inclined mineral strata. An important technical task at the present time is the creation of mining equipment that allows, with minimum costs, to develop steeply falling ore bodies from the surface. Open-underground mining of ore bodies allows to significantly reduce the stripping ratio, as a result of which the cost of mining of mineral resources decreases, and the profitability of mining production will increase.

УДК 69.002.51:621.225.2

Уточнённая классификация гидроцилиндров

Кобзов Д.Ю.[1a], Ереско С.П.[2], Губанов В.Г.[3], Лханаг Д.[4], Плеханов Г.Н.[1], Жмуров В.В.[1], Кобзова И.О.[1], Кулаков А.Ю.[1], Трофимов А.А.[1]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[2]Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. им. газеты "Красноярский рабочий" 31, Красноярск, Россия
[3]ООО НТЦ «Гидротранс», Мебельный проезд 10А, Санкт-Петербург, Россия
[4]Монгольский государственный университет науки и технологии, Хан-Уул дүүрэг, 3-р хороо, Энгельсийн гудамж, Улан-Батор, Монголия
[a]Kobzov7159@mail.ru

Ключевые слова: винтовой гидроцилиндр, классификация, полый гидроцилиндр, телескопический гидроцилиндр

В качестве гидродвигателей возвратно-поступательного действия гидрофицированного рабочего оборудования дорожных и строительных машин (ДСМ) в настоящее время широко применяются гидроцилиндры двустороннего действия с односторонним штоком. Их классификация и назначение, устройство и виды исполнения, принцип действия и условия применения, схемы кинематического включения и гидравлического подключения, а также теоретически обоснованные и запатентованные практические рекомендации по обеспечению их работоспособности и повышению надёжности в условиях роста единичных мощностей ДСМ, предполагающего, применительно к гидроцилиндрам, повышение уровня давления рабочей жидкости гидросистем, увеличение скорости перемещения штока, и его хода, а также размеров гидроцилиндров и, зачастую, интенсивности использования их во времени, достаточно подробно изложены в трудах отечественных и зарубежных учёных. Тем не менее, возрастающие требования эксплуатантов ДСМ в совершенствовании их конструкции, повышении надёжности и расширении технологических возможностей, наряду с растущими потребностями использования гидрофицированных машин в условиях постоянного расширения области человеческой деятельности, подтверждают актуальность работ в этом направлении.

Введение. Анализ кинематических особенностей выявленных [1] 239 схем привода исполнительных органов реальных гидрофицированных технических объектов, содержащих 501 гидроцилиндр и работающих в поле тяготения, в пределах, выше или ниже линии горизонта, в условиях, обозначенных объективными требованиями и субъективными намерениями эксплуатантов, позволил сделать некоторые следующие заключения.

Во-первых, рассматриваемые схемы либо уже применяются, либо могут быть использованы в качестве привода рабочего оборудования современных ДСМ.

Во-вторых, 39,7% из них содержат один гидроцилиндр, 27,6% - два, 18,4% - три, 11,7% - четыре и 2,6% - пять. То есть, более 60% схем являются многозвенными, в большинстве которых функционирование как минимум одного гидроцилиндра прямо или косвенно влияет на рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения остальных.

В-третьих, в процессе работы привода всего 9,2% гидроцилиндров не изменяют своего пространственного расположения. Из них 7% приходится на долю схем с одним гидроцилиндром, а оставшиеся 2,2% - с двумя.

В-четвёртых, в большинстве из них при функционировании гидроцилиндра в опорах его корпуса (85,6%) и штока (88,6%) наблюдается силовой поворот либо вращение элементов сопряжения.

В-пятых, в 75,4% случаев гидроцилиндр с другими элементами привода образует треугольник, а в 22,2% - многоугольник.

И, наконец, наибольшее распространение из всего многообразия типов гидроцилиндров (Рис. 1) имеют гидроцилиндры одно- и двустороннего действия с односторонним штоком. Это же подтверждается отечественными и зарубежными справочными данными [1] об ассортименте серийного и единичного выпуска гидроцилиндров различных типоразмеров, в соответствии с которыми, доля поршневых гидроцилиндров двустороннего действия (Рис. 1.9, 1.17-1.20) составляет 85%, одностороннего действия с односторонним штоком (Рис. 1.7) - 1%, двустороннего действия с двусторонним штоком (Рис. 1.10) - 0,5%, плунжерных - 10% (Рис. 1.5), телескопических (Рис. 1.6, 1.8) - 1% и моментных гидроцилиндров (Рис. 1.11, 1.12) - 2,5%.

При этом наиболее полная классификация гидроцилиндров, используемых в объектах машиностроения, приведена в работе [2].

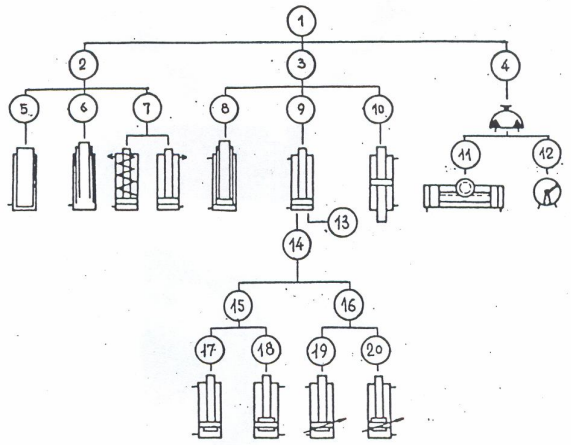


Рис. 1. Известная классификация гидроцилиндров [2]

Основная часть. Возрастающие требования эксплуатантов ДСМ к их эффективности, надёжности и работоспособности, в условиях расширения области человеческой деятельности, постоянно вносят некоторые коррективы, особенно, в части расширения их технологических возможностей. Это требует совершенствования собственно конструкции гидрофицированного привода их рабочего оборудования, в том числе, за счёт расширения его технологических возможностей, в частности, путём совершенствования применяемых в его конструкции гидроцилиндров.

В частности, гидрофицированный привод поворота ковша одноковшовой ДСМ по Патенту РФ №2270298 позволяет увеличить диапазон изменения угла поворота ковша и упростить конструкцию его привода, в частности.

Гидрофицированный привод поворота ковша одноковшовой землеройной машины (Рис.2) содержит силовой гидроцилиндр 1, установленный на рукояти 2, и ковш 3, корпус гидроцилиндра жестко соединен с рукоятью в любой его точке, силовой гидроцилиндр поворота ковша является гидроцилиндром двустороннего действия с двусторонним штоком, обе проушины штока шарнирно соединены с ковшом в точках его крепления, при этом продольная ось гидроцилиндра и точки крепления ковша лежат на замкнутой окружности, а длина замкнутой окружности равна двум ходам штока и длине дуги между опорами ковша, штоковая и поршневая полости гидроцилиндра присоединены к гидросистеме землеройной машины.

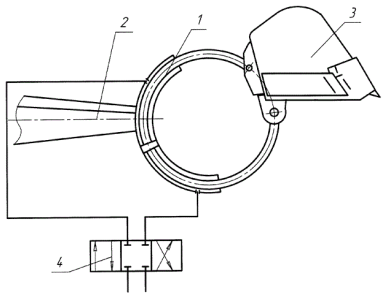


Рис. 2. Принципиальная схема привода ковша одноковшовой ДСМ

При этом продольная ось гидроцилиндра и точки крепления ковша лежат на замкнутой окружности, а длина замкнутой окружности равна двум ходам штока и длине дуги между опорами ковша.

При подаче рабочей жидкости из распределителя 4 гидросистемы машины в поршневую полость силового гидроцилиндра 1 двустороннего действия с двусторонним штоком, непосредственно на ковш передает усилие и производит копание, из поршневой полости жидкости переходит обратно в гидросистему машины.

Таким образом, использование данного привода поворота ковша одноковшовой машины позволяет повысить диапазон изменения угла поворота ковша и упрощает его конструкцию (Рис.3).

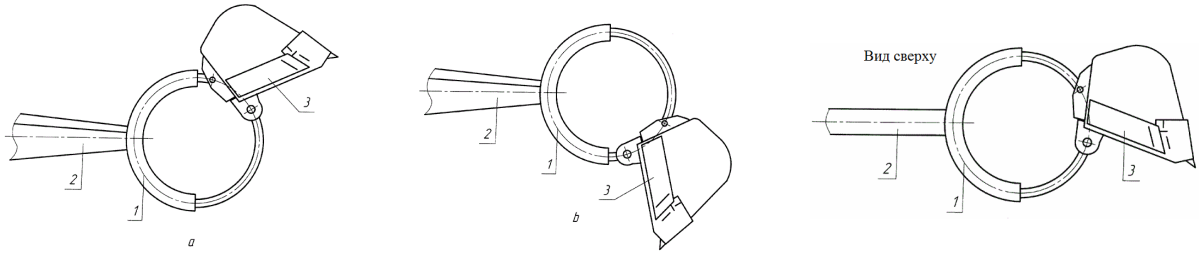


Рис. 3. Крайние положения ковша и принципиальная схема привода ковша при его возможном горизонтальном расположении

Думается, интерес представляет также телескопический гидроцилиндр по Патенту РФ №2272940, позволяющий исключить такой недостаток известных гидрофицированных телескопов, как-то – относительно небольшой путь перемещения штока, ограниченный длиной корпуса гидроцилиндра [3, 4].

Упомянутый гидроцилиндр позволяет повысить функциональные возможности аналогов для многофункциональных гидрофицированных машин, роботов и манипуляторов, а также упростить конструкцию привода их рабочих (исполнительных) элементов.

Такой гидроцилиндр (Рис. 4) содержит корпус 1 с крышками и элементами крепления, установленную в нём телескопическую трубу 2, имеющую внешнюю крышку с элементом крепления и поршнем с направляющим и уплотнительным элементами. В трубе расположен

полый шток 3 с поршнем, направляющими и уплотнительными элементами. Корпус имеет внешние подводы 4, 5 жидкости. Телескопическая труба 2, дополнительно имеет внешний подвод 6 жидкости и неподвижную внутреннюю крышку 7 с направляющим и уплотнительным элементами. При этом полый шток 3 с поршнем имеет внешний подвод 8 и внутренний отвод 9 жидкости и установлен в противоположном выдвижению телескопической трубы 2 направлении и проходит через заднюю неподвижную крышку корпуса 1 гидроцилиндра, дополнительно снабжённую направляющими и уплотнительными элементами. Важно, что продольные оси штока, телескопической трубы и корпуса гидроцилиндра совпадают и при полном выдвижении штока или телескопической трубы образуют замкнутую окружность.

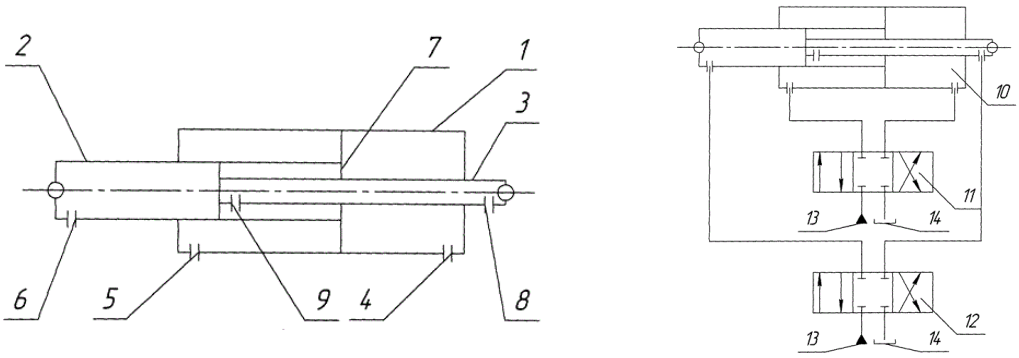


Рис.4. Схема телескопического гидроцилиндра двухстороннего действия с двусторонним штоком и принципиальная гидросхема его подключения

Предлагаемый вниманию гидроцилиндр работает следующим образом.

Гидроцилиндр 10 подключается через распределители 11 и 12 к источнику питания (насосу) 13 и сливу 14 штатной гидросистемы (фиг 5).

При подаче жидкости в поршневую полость гидроцилиндра через подвод 4 (Рис.4) жидкость вытесняется через отверстие 5 из штоковой полости и телескопическая труба 2 выдвигается из корпуса 1 гидроцилиндра. При закрытых подводах 6 и 8 жидкости этот процесс сопровождается вдвижением штока 3 в корпус 1. При одновременной подачи жидкости через подвод 6 шток 3 будет одновременно выдвигаться из трубы 2. В зависимости от скорости подачи (расхода) жидкости шток 3 будет либо выдвигаться из корпуса 1, либо находиться в состоянии покоя относительно последнего.

При подаче жидкости в штоковую полость гидроцилиндра через подвод 5 (Рис. 4) жидкость вытесняется через отверстие 4 из поршневой полости и телескопическая труба 2 вдвигается в корпус 1 гидроцилиндра. При закрытых подводах 6 и 8 жидкости этот процесс сопровождается выдвижением штока 3 из корпуса 1. При одновременной подачи жидкости через подвод 8 шток 3 будет одновременно вдвигаться в трубу 2. В зависимости от скорости подачи (расхода) жидкости шток 3 будет либо вдвигаться в корпус 1, либо находиться в состоянии покоя относительно последнего.

Выдвижение штока 3 гидроцилиндра достигается подводом жидкости в поршневую полость телескопической трубы 2 через отверстие 6. При этом жидкость через отверстия 8 и 9 (Рис.4) поступает на слив 14 штатной гидросистемы.

Одновременное выдвижение из корпуса 1 гидроцилиндра телескопической трубы 2 и штока 3 достигается подачей жидкости через отверстия 4 и 6. Аналогично, одновременное вдвижение этих элементов осуществляется в результате подвода жидкости через отверстия 5 и 8 (Рис.4).

Во всех вышеперечисленных случаях скорости движения подвижных элементов 2 и 3 регулируются расходом подводимой жидкости. Эта операция позволяет также осуществить раздельное, синхронное или одновременное, но с различными скоростями движение подвижных элементов, тем самым достичь эффекта дифференциального гидроцилиндра (Рис.5).

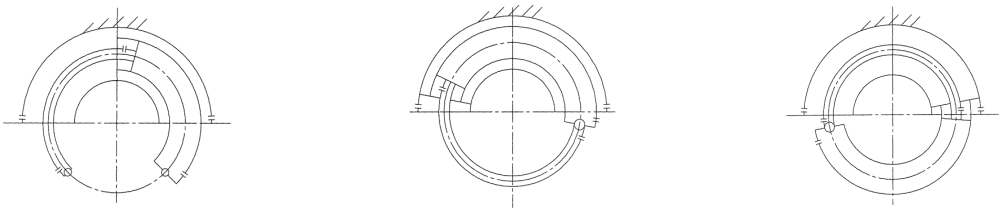


Рис. 5. Возможные варианты работы телескопического кругового гидроцилиндра

Описываемый гидроцилиндр может использоваться в конструкции многофункциональных гидрофицированных машин, а также роботов и манипуляторов, например, в качестве гидромеханической руки (Рис.5), по простоте имеющей преимущества перед известными зажимами, широко используемыми в роботизированных производственных системах [3].

Кроме этого, этот гидроцилиндр может использоваться в летательных и плавательных гидрофицированных аппаратах, что отмечено в работе [4] в качестве привода многофункциональных рулей, в том числе высоты, направления и крена, состоящих из двух несущих подвижных поверхностей, которые могут поворачиваться раздельно и вместе, как одно целое (Рис. 6).

Аналогично – в качестве элемента ходового оборудования шагающих машин, манипуляторов и роботов - гидромеханической стопы с одним или несколькими расположенными параллельно заявляемыми гидроцилиндрами (Рис.6).

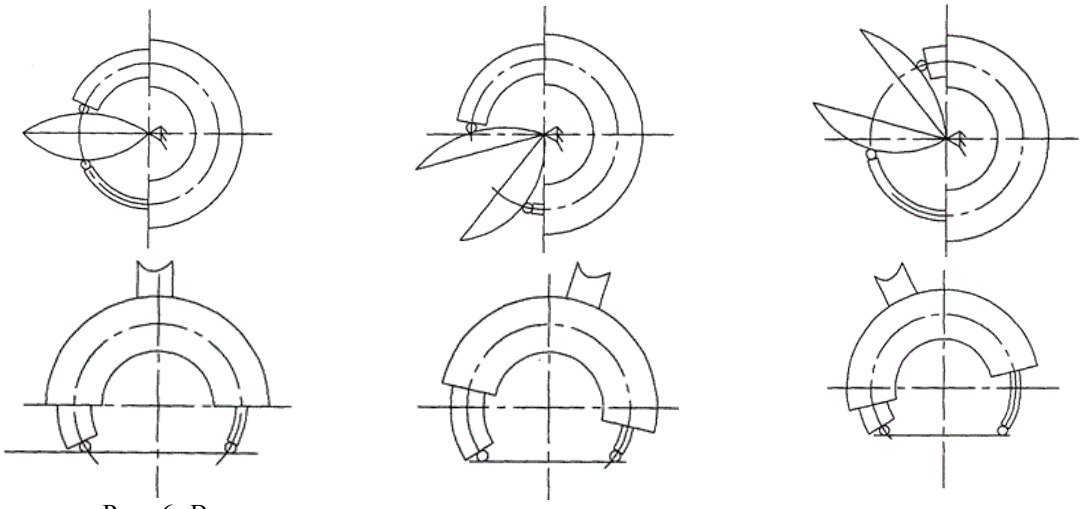


Рис. 6. Возможные варианты использования телескопического кругового гидроцилиндра в конструкции объектов машиностроения

Определённый интерес представляют полые гидроцилиндры, например, по Патенту РФ №2596679 (Рис. 7), используемые в качестве несущей оболочечной конструкции переменной длины, внутри которой могут располагаться какие-либо коммуникации, например, в качестве несущей телескопической конструкции переменной длины гидрофицированных грузоподъёмных, землеройных, копровых, электромонтажных и прочих технических систем, включая медицину и металлургию.

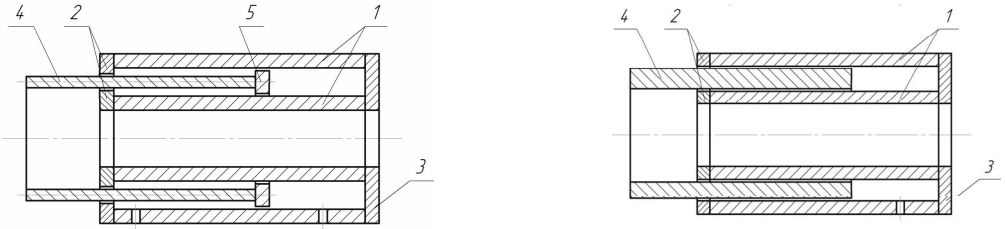


Рис. 7. Принципиальные схемы полых гидроцилиндров двухстороннего и одностороннего действия

Полый гидроцилиндр (Рис.7), содержащий корпус с элементами крепления, состоящий из передней и задней торцевых крышек, снабженных уплотнителями и элементами их крепления на корпусе, полый шток с элементами крепления и с закреплённым на нём полым поршнем с уплотнителями, причём корпус 1, выполнен в виде двух полых цилиндров, соосно вставленных друг в друга с образованием между ними кольцевой полости и соединённых между собой передней 2 и задней 3 полыми торцевыми крышками, полый шток 4 с полым поршнем 5, вставлены в полое кольцевое пространство между цилиндрами корпуса 1, а передняя крышка 2, выполнена разъёмной, состоящей из двух торцевых шайб.

При этом полый гидроцилиндр двухстороннего действия работает следующим образом. При подаче рабочей жидкости в поршневую полость полого гидроцилиндра его шток начинает выдвигаться из корпуса, а при подаче рабочей жидкости в штоковую полость - вдвигается. При этом через его внутреннюю полость могут проходить различные коммуникации или элементы других приводов, а сам полый гидроцилиндр, будучи оболочкой переменной длины, может служить либо их дополнительной защитой, либо несущим элементом в зависимости от назначения, условий работы, рабочего процесса и режима работы гидрофицированной системы.

Полый гидроцилиндр одностороннего действия работает следующим образом.

При подаче рабочей жидкости в поршневую полость вертикально расположенного полого гидроцилиндра его шток начинает выдвигаться из корпуса, а обратное при сливе рабочей жидкости из поршневой полости его шток опускается, вдвигаясь в корпус под действием сил тяжести. При этом через его внутреннюю полость также могут проходить различные коммуникации или элементы других приводов, а сам полый гидроцилиндр, будучи оболочкой переменной длины, может служить либо их дополнительной защитой, либо несущим элементом в зависимости от назначения, условий работы, рабочего процесса и режима работы гидрофицированной системы.

Интерес представляет использование и винтового гидроцилиндра, который запатентован (Заключение РОСПАТЕНТа от 06.10.2016 по результатам экспертизы о признании изобретением по заявке №2015108728/06(013882), приоритет от 12.03.2015) и может быть использован, например, в качестве несущей винтовой конструкции переменной длины, используемой, либо, в качестве привода крупногабаритных вентилей в труднодоступных или небезопасных местах, или в качестве рабочего оборудования, закрепленного на зондах и предназначенного для очистки труднодоступных внутренних или внешних цилиндрических поверхностей, при этом через пространство, ограниченное винтовой линией гидроцилиндра, могут проходить различные коммуникации или элементы других приводов, при этом сам винтовой гидроцилиндр может служить либо их дополнительной защитой, либо несущим элементом в зависимости от назначения, условий работы, рабочего процесса и режима работы гидрофицированной системы.

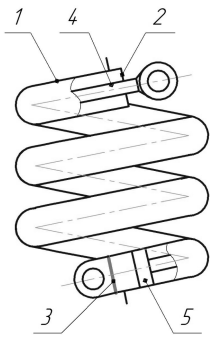


Рис. 8. Принципиальная схема винтового гидроцилиндра

Винтовой гидроцилиндр (Рис.8), содержащий корпус 1 с элементами крепления, состоящий из передней 2 и задней 3 торцевых крышек, снабженных уплотнителями и элементами их крепления на корпусе, шток 4 с элементами крепления и с закреплённым на нём поршнем 5 с уплотнителями при этом продольная ось гидроцилиндра образует винтовую ли-

нию с заданным числом витков. При подаче рабочей жидкости в поршневую либо штоковую полости винтового гидроцилиндра его шток начинает соответственно выдвигаться из корпуса либо задвигаться. При этом, шток гидроцилиндра осуществляет силовое перемещение по винтовой линии согласно функциональному назначению, а через пространство, ограниченное винтовой линией гидроцилиндра, могут проходить различные коммуникации или элементы других приводов, а сам винтовой гидроцилиндр может служить либо их дополнительной защитой, либо несущим элементом в зависимости от назначения, условий работы, рабочего процесса и режима работы гидрофицированной системы.

Названный гидроагрегат преобразует возвратно-поступательное перемещение штока в поворотное движение всей конструкции относительно центральной его оси. При этом, число витков соосного многокорпусного винтового гидроцилиндра обеспечивает более равномерное распределение по окружности создаваемой им нагрузки, требуемой для нормального функционирования, в частности, крупногабаритных вентилей в труднодоступных или небезопасных условиях эксплуатации. Не следует забывать, что поршневые и штоковые полости такого гидроцилиндра должны быть соответственно соединены.

В **заключении** надо отметить, что представленные выше некоторые новые технические решения совершенствования конструкции гидроцилиндров позволяют не только расширить технологические возможности гидрофицированных объектов машиностроения, но и на основе анализа уточнённой классификации гидроцилиндров (Рис. 9), прогнозировать их дальнейшее развитие, направленное на реализацию возрастающих потребностей машиностроителей.

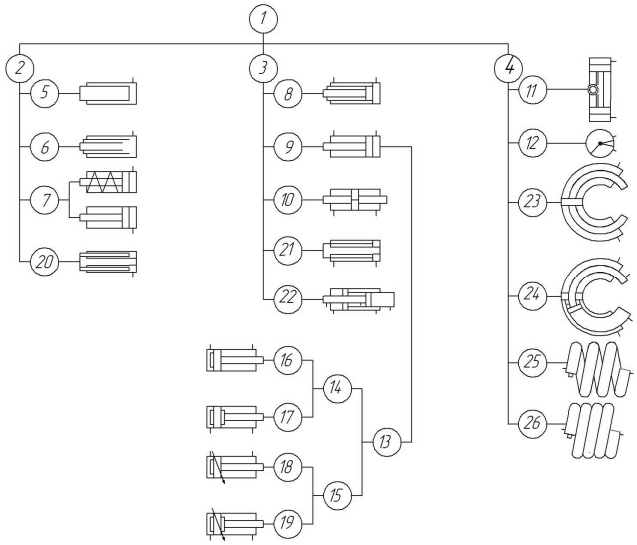


Рис. 9. Уточнённая классификация гидроцилиндров машин

Литература:

1. Кобзов Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 1. Конструкция. Надёжность. Перспективы развития // Братск. индустр. ин-т. - Братск, 1998. – 59 с., ил., библиогр. 246 назв. – Рус. – Деп. в МАШМИР 13.08.1998, № 2-сд1998.

2. 36-th Annual Designer's Guide: To fluid power products – Cylinders // Hydraulics & Pneumatics, USA, 1992, January. pp. 84-86. (на англ.яз.)

3. Справочник по промышленной робототехнике. Книга 1. Под редакцией Ш. Нофа.– М.: Машиностроение, 1989. С. 421, рис. 25.37 и рис. 25.39.

4. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Плешивцева С.В. Гидроцилиндр. Изобретатели – машиностроению. – 2009. – №1. – С. 14-16.

Revised classification of hydraulic cylinders

Kobzov D.Yu.[1,a], Eresko S.P.[2], Gubanov V.G. [3], Lkhanag D.[4], Plekhanov G.N.[1], Zhmurov V.V. [1], Kobzova I.O.[1], Kulakov A.Yu[1], Trofimov A.A.[1]

[1]Bratsk State University, Makarenko St. 40, Bratsk, Russia
[2]Siberian state airspace university, 31 Boulevard of name of newspaper "Red worker", Krasnoyarsk, Russia
[3]S&TC «HydroTrans», 10A Mebel'ny proezd, Saint-Petersburg, Russia
[4]Mongolian state university of science and technology, Хан-Уул дүүрэг, 3-р хороо, Энгельсийн гудамж, Ulaan-Baatar, Mongolia
[a]Kobzov7159@mail.ru

Keywords: screw hydrocylinder, classification, hollow hydrocylinder, telescopic hydrocylinder

As hydraulic reciprocating action hydraulic working equipment road and construction machines (RBCM) now widely used double-acting hydraulic cylinders on one rod. Their classification and assignment, device and types of performance, principle and application conditions, schemes of the kinematic inclusion and hydraulic connections, and conceptualized and patented practical recommendations to ensure their efficiency and increase reliability in growth of unit capacity RBCM, applied to hydraulic cylinders, raising the level of the working fluid pressure hydraulic systems, increasing the speed of a piston rod, and his progress, as well as sizes of cylinders and often, their usage over time, enough detail in the works of national and foreign scientists. However, the increasing demands of RBCM operators in improving their design, improve reliability and increase technological capabilities, along with the growing needs of the hydroficated use machines in permanent expansion of human activity, confirm the relevance of the work in this direction.

УДК 621.86

Перегрузочный пункт для комбинированного транспорта

Чебан А.Ю.[a], Соболев А.А.[b], Корнеева С.И.[c]

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия
[a]chebanay@mail.ru, [b]alexsoboll@mail.ru, [c]skorneeva@mail.ru

Ключевые слова: автосамосвал, баржа, бункер, рама, насыпной материал

Транспортные операции составляют значительную, а иногда и основную долю в себестоимости насыпных строительных материалов. При отдаленном расположении потребителей от мест добычи для перевозки больших объемов грузов используется железнодорожный или речной транспорт. Речной транспорт позволяет доставлять грузы в труднодоступные места, где отсутствует или слабо развита транспортная инфраструктура, особенно это актуально для ряда районов Сибири и Дальнего Востока. При этом от места добычи до водной артерии груз обычно доставляется автосамосвалами. В настоящее время при перевалке насыпных грузов с автомобильного транспорта на речной требуется создание промежуточного склада, что ведет к увеличению себестоимости транспортировки. В статье рассматриваются известные конструкции перегрузочных устройств обеспечения непосредственной перевалки насыпных грузов из автосамосвалов в трюмы судна. Предлагается конструкция перегрузочного пункта, включающего рельсовую колею, тележку, раму, бункеры, направляющие, гидропривод, и позволяющего с минимальными эксплуатационными и капитальными затратами и высоким уровнем техники безопасности решить задачу по перевалке насыпных строительных материалов.

Введение. Речной транспорт позволяет доставлять грузы в труднодоступные места, где отсутствует или слабо развита транспортная инфраструктура, особенно это актуально для ряда районов Сибири и Дальнего Востока. Наиболее массовыми являются такие грузы как

щебень, гравий, песок и песчано-гравийная смесь, используемые в качестве строительных материалов [1]. Потребность в строительных материалах максимально возрастает именно в теплый период года, когда осуществляется судоходство, следовательно, речной транспорт, взяв на себя перевозку подобных грузов, разгрузит другие виды транспорта, чем повысит пропускную способность всей транспортной инфраструктуры регионов.

Некоторые предприятия ведущие добычу и переработку строительных горных пород, производящие щебень и другие строительные материалы, расположены на определенном удалении от речных коммуникаций, через которые планируется отправлять готовую продукцию потребителям [1-2]. Разработка строительных горных пород ведется с применением одноковшовых экскаваторов, скреперов, карьерных комбайнов, землесосных снарядов и других горных машин [3-9]. Транспортирование щебня и других насыпных материалов до средств водного транспорта осуществляется, как правило, строительными автосамосвалами, которые могут перемещаться по автомобильным дорогам общего пользования и имеют грузоподъемность 7-20 тонн [1]. Обычно автосамосвалы разгружаются на специальных промежуточных складах готовой продукции расположенных вблизи водных коммуникаций, данные склады оснащаются различным перегрузочным оборудованием в виде портальных кранов, конвейеров, устройств гидротранспорта. Организация промежуточного склада связана с необходимостью соответствующего землеотвода, приобретением специального перегрузочного оборудования и вспомогательных машин в виде бульдозера или погрузчика, а также с содержанием на складе специального персонала для обслуживания этой техники, что связано со значительными дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами в дальнейшем отражающимися на стоимости строительных материалов [9]. Таким образом, совершенствование и оптимизация перегрузочных операций с целью снижения стоимости работ и количества задействованного погрузочного оборудования при перевалке насыпных грузов из автомобильного в водный транспорт является актуальной задачей.

Перегрузочные пункты для насыпных грузов. Для обеспечения непосредственной разгрузки насыпных грузов из автосамосвалов в трюмы судна разработаны погрузочные пункты, включающие эстакаду с дорожным покрытием, расположенную вдоль причальной стенки, рельсовую колею, размещенную под эстакадой, тележку с рамой и загрузочным желобом, гидроцилиндры управления рамой и загрузочным желобом, механизм перемещения тележки по рельсам [2, 11, 12]. После швартовки транспортного судна к причальной стенке тележка с загрузочным желобом перемещается по рельсам в пределах фронта погрузки до положения, соответствующего размещению загрузочного желоба между смежными колонами эстакады. В этом положении тележка останавливается, включаются гидроцилиндры управления рамой и загрузочным желобом и разворачивают их в положение для приема сыпучего материала из кузова автосамосвала. Одновременно с этим автосамосвал по подъездной дороге въезжает на эстакаду с дорожным покрытием, останавливается напротив загрузочного желоба и разгружается, сыпучий материал самотеком направляется на загрузочный желоб, а с него попадает в трюм судна, образуя штабель симметричный продольной оси судна. После заполнения соответствующего участка трюма, гидроцилиндры поворачивают раму и загрузочный желоб в транспортное положение, и тележка перемещается по рельсовому пути в новое положение, при котором загрузочный желоб оказывается между очередными смежными колоннами эстакады, затем описанный выше процесс повторяется.

Применение данных погрузочных устройств позволяет отказаться от промежуточного склада, однако строительство эстакады с дорожным покрытием для перемещения по ней автосамосвалов с грузом требует значительных дополнительных капитальных затрат и затрудняет использование причала для работы с другими грузами; при перемещении тележки по рельсам вдоль причальной стенки требуется постоянное сворачивание и разворачивание рамы и загрузочного желоба с помощью гидроцилиндров, что снижает производительность погрузочного устройства; движение автосамосвала по эстакаде и разгрузка на ней снижает безопасность ведения перегрузочных работ.

Результаты исследований. Устранить вышеперечисленные недостатки позволяет разработанный в Институте горного дела ДВО РАН перегрузочный пункт для насыпных строительных материалов из автосамосвалов в трюмы судна. Перегрузочный пункт включает в себя рельсовую колею 1, тележку 2, бункеры 3 и 4, рамы 5 и 6 бункеров, гидроцилиндры 7 подъема-опускания рам, гидроцилиндры 8 поворота бункеров, привод 9 (рис. 1). Рамы 5 и 6 шарнирами 10 подвижно связаны с тележкой 2, а бункеры 3 и 4 при помощи шарниров 11 подвижно соединены с рамами 5 и 6. Привод 9 (автономный или с питанием от внешнего источника энергии) установлен на тележке 2.

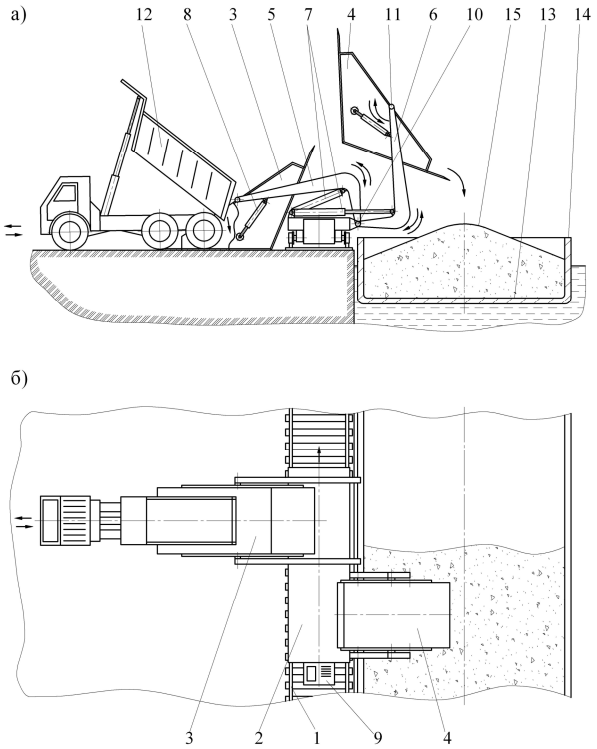


Рис. 1. Схема перегрузочного пункта: *а* – общий вид; *б* – вид сверху

Работа перегрузочного пункта следующим образом. Автосамосвал 12 задним ходом частично заезжает в один из бункеров, например в бункер 3, находящийся в нижнем положении, и разгружается в нем, бункер 3 в данном случае также является противовесом для обеспечения устойчивости тележки 2 при разгрузке бункера 4. Бункер 4, ранее загруженный другим автосамосвалом, при помощи рамы 6, гидроцилиндров 7, 8 и привода 9 перемещается в пространстве, позиционируется над трюмом 13 судна 14 и разгружается в трюм, образуя штабель 15 симметричный продольной оси судна. Управление перемещением бункера производится оператором перегрузочного пункта с выносного пульта управления, при этом автоматически через блок управления обеспечивается синхронизация работы гидроцилиндров 7 и 8 для выравнивания угла наклона днища бункера 4, перемещаемого в пространстве для исключения просыпания насыпного материала. После разгрузки бункера 4 в трюм судна происходит его возвращение в нижнее положение, и начинается подъем загруженного бункера 3. При заполнении соответствующего участка трюма судна тележка с порожними бункерами перемещается по рельсовому пути вдоль фронта погрузки в новое положение, затем описанный выше процесс повторяется.

Таким образом, перегрузочным пунктом обеспечиваются одновременно протекающие процессы приема сыпучих материалов и их погрузки в трюм судна, а также периодическое перемещение тележки по рельсам на всю длину фронта погрузки, равного суммарной длине трюмов судна.

Выводы. Предлагаемая конструкция перегрузочного пункта для насыпных строительных материалов позволяет с минимальными эксплуатационными и капитальными затра-

тами решить задачу по перевалке грузов из автосамосвалов в средства водного транспорта в условиях удаленного расположения производственно-добывающих предприятий от транспортных коммуникаций. Перегрузочный пункт увеличивает производительность погрузки насыпных материалов за счет ведения процесса посредством двух бункеров и автоматизации управления перемещением бункеров в пространстве, а также обеспечивает высокий уровень техники безопасности при ведении работ.

Литература:

1. Чебан А.Ю. Техническое оснащение предприятий по добыче нерудных строительных материалов в Хабаровском крае // Механизация строительства. 2017. №2. С. 23-26.
2. Тарасов Ю.Д. Перегрузка насыпных грузов из автомобилей-самосвалов в средства водного транспорта // Горное оборудование и электромеханика. 2010. №6. С. 15-21.
3. Чебан А.Ю. Гидромеханизированная добыча строительных горных пород в бассейне реки Амур // Вестник государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова. 2016. № 2 (36). С. 73-78.
4. Ground work with the Hyundai R800LS-9 all-electric excavator. // Zement-Kalk-Gips Int. 2014. 67, № 1-2, p. 19.
5. Чебан А.Ю. Скрепер с комбинированной интенсификацией загрузки ковша // Механизация строительства. 2015. №4. С. 4-6.
6. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus / Russia. // Zement-Kalk-Gips Int. 2014. 67, № 10, p. 18.
7. Чебан А.Ю., Шемякин С.А. Сопротивление разгрузке удлиненных ковшей скреперов // Строительные и дорожные машины. 2008. №6. С. 45-48.
8. Пихлер М., Журавлев А.А., Панкевич Ю.Б. Результаты опытно-промышленных работ при тонкослоевой разработке комбайном Wirtgen 2200SM строительных известняков Пятовского месторождения // Горная промышленность. 2009. №1. С. 16-20.
9. Чебан А.Ю. Разработка русловых и обводненных месторождений песка и песчано-гравийных материалов в Приморском крае // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. №5. С. 97-103.
10. Чебан А.Ю. Устройство для перегрузки насыпных строительных материалов из автосамосвалов в железнодорожный транспорт // Механизация строительства. 2016. Т. 77. №2. С. 33-36.
11. Пат. 2268225 (РФ) Устройство для погрузки сыпучих грузов в трюм судна / Ю.Д. Тарасов. Заявл. 22.06.2004. № 2004122606. Опубл. 20.01.2006. МПК B 65G 67/60. Бюл. № 02.
12. Пат. 2329937 (РФ) Устройство для погрузки сыпучих грузов в трюмы судна / Ю.Д. Тарасов. Заявл. 26.02.2007. № 2007107292. Опубл. 27.07.2008. МПК B 65G 67/02, 67/60, 63/00. Бюл. № 21.

Loading point for combined transport

Cheban A.Yu.[a], Sobolev A.A.[b], Korneeva S.I.[c]

Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a]chebanay@mail.ru, [b]alexsoboll@mail.ru, [c]skorneeva@mail.ru

Keywords: Dump truck, barge, bunker, frame, bulk material

Transport operations constitute a significant, and sometimes the main share in the cost of bulk building materials. With remote location of consumers from the production sites for the transportation of large volumes of goods, railway or river transport is used. River transport allows you to deliver goods to hard-to-reach places where there is no or poorly developed transport infrastructure, especially this is relevant for a number of regions of Siberia and the Far East. At the same time from the place of extraction to the waterway, the cargo is usually delivered by dump trucks. At present, when transshipping bulk cargo from motor transport to the river, an intermediate warehouse is required, which leads to an increase in the cost of transportation. In the article, well-known designs of reloading devices for ensuring direct transshipment of bulk cargo from dump trucks to vessel holds are considered. The design of a reloading station including a rail track, a cart, a frame, bunkers, guides, a hydraulic drive is offered, and allowing to solve the task of transshipment of bulk building materials with minimal operational and capital costs and high level of safety engineering.

УДК 621.879

Тенденции развития методов снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов по конкурирующим группам

Зеньков С.А.[a], Абдукундузов А.В.[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a] mf@brstu.ru, [b] regar.kahor@gmail.com

Ключевые слова: методы снижения, адгезия грунтов, динамика патентования, коэффициент динамичности

В данной статье определены перспективные способы снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов по конкурирующим группам на основе анализа патентной информации. Приведена методика анализа осуществлена группировка патентов по направлениям, получены математические модели и их статистические характеристики. Методика анализа включает: предварительное изучение патентной информации с целью выявления основных направлений (конкурирующих групп) использования методов и устройств снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов; патентный поиск, составление информационных массивов авторских свидетельств и патентов по каждому направлению; математическую обработку статических данных и получение функций - математических моделей, аппроксимирующих соответствующие массивы информации по динамике патентования; сравнительный анализ функций с целью определения доминирующего направления и выявления перспективности каждого направления. Построены графики динамики патентования.

С целью выявления на современном этапе наиболее перспективных и эффективных методов снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов необходимо определить тенденции их развития. Тенденции установлены по анализу патентной информации [1]. Методика анализа включает: предварительное изучение патентной информации с целью выявления основных направлений (конкурирующих групп) использования методов и устройств снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов; патентный поиск, составление информационных массивов авторских свидетельств и патентов по каждому направлению; математическую обработку статических данных и получение функций - математических моделей, аппроксимирующих соответствующие массивы информации по динамике патентования; сравнительный анализ функций с целью определения доминирующего направления и выявления перспективности каждого направления.

Изучение научно-технической информации [2-10] и патентного фонда по использованию методов и устройств снижения адгезии грунта к ковшам экскаваторов позволило все авторские свидетельства и патенты сгруппировать по следующим группам (направлениям):

1. Образование на границе контакта промежуточного слоя. Этот слой может быть твердым, жидким и газообразным. Например, ковш землеройной машины [2].

Изобретение относится к рабочему оборудованию машин для земляных работ, в частности к ковшам и может быть использовано, например, на ковшевых погрузчиках и экскаваторах.

Ковш землеройной машины (рис.1, 2), включающий корпус, выполненный с образующими поверхность электродными частями, смежные из которых соединены с противоположными полюсами источника постоянного тока, отличающийся тем, что, с целью повышения производительности машины при ее работе в условиях отрицательной температуры воздуха, катодные части корпуса выполнены со сквозными каналами, сообщающими внутреннюю поверхность корпуса с наружной, и имеют размещенные в них электронагревательные элементы, через которые они соединены с источником тока.

2. Внешнее интенсифицирующее воздействие. Это может быть нагрев, вибрация, электромагнитная поля.

3. Внешнее воздействие с помощью нагрева. Например, электронагреватель для обогрева ковша экскаватора [5].

Электронагреватель для обогрева ковша экскаватора (рис.3), включающий кожух и нагревательный элемент, отличающийся тем, что, с целю повышения теплопередачи и уменьшения энергозатрат, его нагревательный элемент выполнен в виде заключенной в кожух графито – песчанной смеси с подводящим электродом, изолированным от кожуха.

Питание электронагревателя осуществляется от сварочного трансформатора, установленного на экскаваторе.

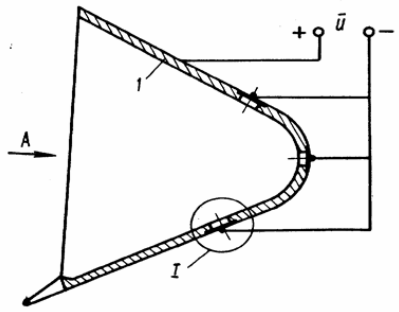


Рис. 1. Ковш с электросхемой подключения электродов, разрез:
1 – корпус

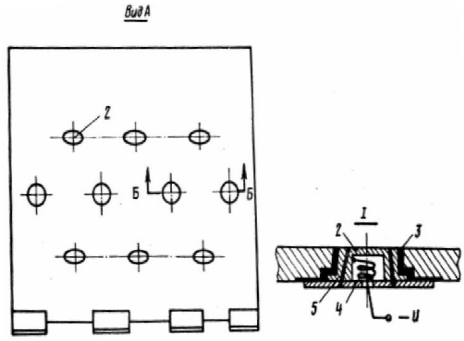


Рис.2. Ковш с электросхемой подключения электродов, разрез:
2 – круглые металлические электроды,
3 – втулка, 4 – электронагревательный спиральный элемент, 5 – сквозные каналы,
6 – грунт, 7 – крышка

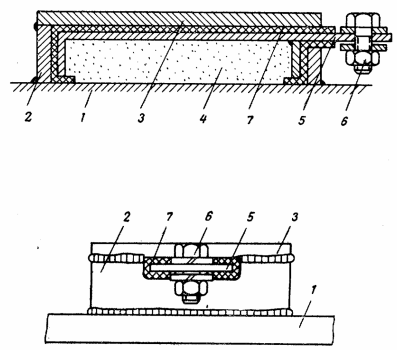
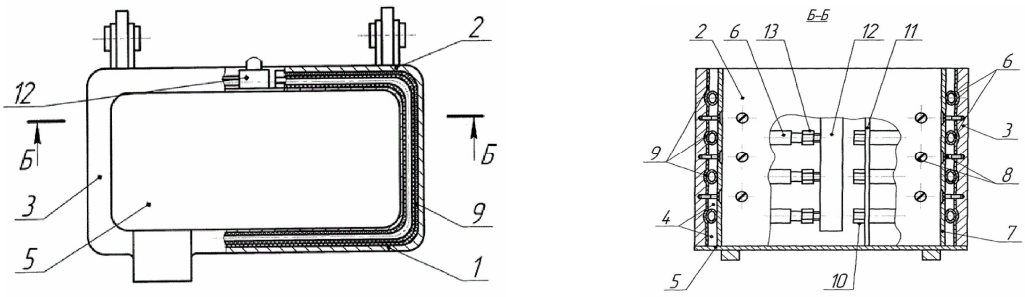


Рис.3. Электронагреватель:
1 – ковш экскаватора, 2 – бурт, 3 – крышка, 4 – нагревательный элемент,
5 – электрод, 6 – контактный болт, 7 – листовой асбест

4. Внешнее воздействие с помощью вибрации. Пример, данного воздействия – ковш экскаватора [1].

Технический результат достигается тем, что ковш экскаватора (рис. 4), содержащий днище, переднюю, заднюю и боковые стенки, вибровозбудитель, систему теплопереноса, снабжен дополнительной внутренней стенкой, выполненной из гибкого упругодеформируемого материала, с образованием между ней и передней, задней и боковыми стенками герметичной полости, заполненной теплоносителем. В полости по поперечному периметру ковша размещен вибровозбудитель, выполненный в виде эластичных оболочек, одни концы которых заглушены и размещены в герметичной полости у задней стенки ковша, а другие концы соединены с коллектором, установленным в полости задней стенки ковша, при этом коллектор связан с источником импульсов давления жидкости. Кроме того, дополнительная внутренняя стенка соединена со стенками ковша посредствам натяжных винтов с возможностью регулирования величины начального поджатия эластичных оболочек и выполнена из ударопрочного полиэтилена высокого давления, в качестве теплоносителя использован кварцевый песок, а эластичные оболочки выполнены в виде рукавов высокого давления.



а) Поперечный разрез ковша *б)* Поперечный разрез Б-Б ковша

Рис. 4 Ковш экскаватора

1 – передняя, 2- задняя, 3 – боковая стенки ковша; 4 – герметичная полость, 5 – днище, 6 – эластичная оболочка, 7 – дополнительная внутренняя стенка, 9 - натяжные винты, 9 – теплоизоляция, 10 – заглушки, 11 – перегородка, 12 – коллектор, 13 – штуцеры, 14 – пластины, 15 – распределитель золотникового типа, 16 – трубопроводы, 17 – гидромотор, 18 – вал, 19 и 20 – регулировочные вентили, 21 – трубопровод, 22 – вход, 23 – выход

5. Конструкторско-технологические методы. В качестве примера такого метода можно рассмотреть экскаваторный ковш с принудительной разгрузкой [6].

Целью является повышение производительности машины за счет улучшения очистки ковша, путем усовершенствования конструкции. Поставленная цель достигается тем, что ковш экскаватора (рис. 5), включающий заднюю и боковые стенки, имеющие шарнирное соединение с рукоятью, днище и поворотное очистное устройство, привод поворота ковша, выполненный в виде рычага и тяг, причем роль очистного устройства выполняет задняя стенка, боковые стенки ковша и подвижная очистная задняя стенка соединены с рукоятью ковша одним и тем же шарниром, а очистная задняя стенка имеет привод поворота, выполненный в виде гидроцилиндра, шток которого шарнирно соединен с ней, а корпус цилиндра шарнирно соединен с рычагом привода поворота ковша, рычаг поворота ковша выполнен в виде тройной вилки, боковые зубцы которой соединены с тягами ковша, а центральный-с гидроцилиндром поворота задней стенки.

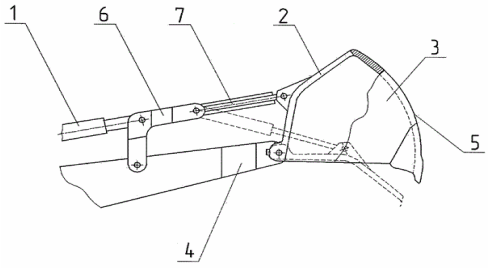


Рис. 5. Ковш экскаватора, общий вид:
1 – гидроцилиндр поворота ковша, 2 – задняя и 3 боковая стенки, 4 – рукоятка, 5 – днище, 6 – привод ковша в виде рычага и 7 – тяга

6. Комбинированные методы. По устройствам, относящимся к комбинированным методам, обнаружены отдельные изобретения (в основном, в последнее время), по которым пока невозможно провести анализ. Глубина патентного поиска по каждому направлению составила 16 лет. Рассматривались отечественные патенты. Всего обнаружено 72 патентов, из которых составлены информационные массивы посредством их распределения по датам подачи заявок и направлениям. По каждому направлению построены графики динамики патентования (рис. 6). Известно [1], что на промежутке времени 10…15 лет кривые динамики патентования по большинству видов техники достаточно достоверно описываются экспонентами вида:

$$N = N_0 \cdot e^{bt} \qquad (1)$$

где N - число патентов в год; e - основание натуральных логарифмов; N_0, b - постоянные для данной кривой коэффициенты (находятся методом наименьших квадратов).

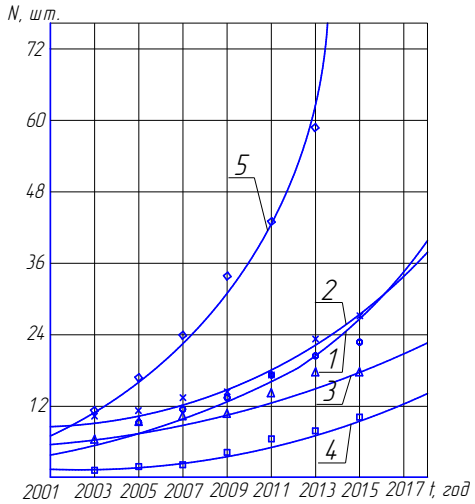


Рис. 6. Динамика патентования изобретений в нарастающем по времени итоге:
1 - образование промежуточного слоя; 2 - внешнее воздействие;
3 - внешнее воздействие с помощью нагрева; 4 - внешнее воздействие с помощью вибрации;
5 - конструкторско-технологические

Полученные с помощью программного комплекса математические модели и их статистические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Математические модели зависимостей, характеризующие динамику патентования методов снижения адгезии

№ п/п	Конкурирующие группы методов	Математические модели зависимостей	Коэффициент динамичности "b"	Среднеквадратичная погрешность аппроксимации	Модуль наибольшего отклонения функции	Относительная погрешность аппроксимации	Корреляционное отношение
1.	Образование промежуточного слоя	$N = 4{,}16 \cdot e^{0{,}137t}$	0,137	1,65	2,9	0,15	0,965
2.	Внешнее воздействие	$N = 7{,}07 \cdot e^{0{,}1t}$	0,1	1,45	2,42	0,60	0,974
3.	Внешнее воздействие нагрев	$N = 5{,}42 \cdot e^{0{,}088t}$	0,088	1,03	2,19	0,73	0,965
4.	Внешнее воздействие – вибрация	$N = 1{,}61 \cdot e^{0{,}138t}$	0,138	0,71	1,38	0,17	0,962
5.	Конструкторско-технологические методы	$N = 6{,}69 \cdot e^{0{,}197t}$	0,197	3,93	5,5	0,28	0,987

Примечание: Значение $t = 0$ соответствует 2001 году, шаг $\Delta t = 1$ соответствует одному году.

Коэффициент "b" (коэффициент динамичности) характеризует знак производной экспоненты (1), т.е. направление изменения динамики патентования. От него зависит и величина производной. Поэтому при сравнении двух тенденций по кривым динамики патентования сравнивают их коэффициенты "b" [1]. Чем больше значение коэффициента "b", тем выше прогрессивность оцениваемой тенденции.

Сравнение численных значений коэффициентов динамичности по исследованным направлениям позволило установить, что наиболее интенсивно развивается конструкторско-технологическое направление (рис. 6, кривая 5), включающее совершенствование формы ковшей и механические устройства очистки, что объясняется, по-видимому, недостаточностью исследований физико-механических методов снижения адгезии грунтов.

Довольно интенсивно развивается направление, где в качестве источника внешнего интенсифицирующего воздействия на адгезию грунтов используется нагрев (рис. 6, кривая

3), а также направление по снижению адгезии грунта к металлу путем образования на границе раздела грунт – металл промежуточного слоя (рис. 6, кривая 1).

В последние годы отмечен рост комбинированных методов и устройств, сочетающих в себе два и более из вышеперечисленных методов.

Литература:

1. Зеньков С.А., Батуро А.А., Булаев К.В. Анализ динамики патентования методов и средств снижения адгезии грунтов к рабочим органам ковшового типа // Строительство: материалы, конструкции, технологии: Материалы III межрегиональной научно – технической конференции. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2005. – 157 с.

2. Заднепровский Р.П. Ковш землеройной машины // патент на изобретение RUS №1081292. 2001. кл, E 02 F 3/24.

3. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. // Journal of Terramechanics 36 (1999) P. 39-49.

4. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. – М.: Машиностроение, 1992. 176 с.

5. Родионов С.А. Электронагреватель для обогрева ковша экскаватора // патент на изобретение RUS №233543. 2002. кл, E 02 F 3/40.

6. Харац Е.А., Яцков А.Н. Рабочее оборудование одноковшового экскаватора // патент на изобретение RUS . №2121041. 2004. кл, E 02 F 3/40.

7. Зеньков С.А., Плеханов Г.Н., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С. Оборудование для определения влияния жидкостного промежуточного слоя на адгезию грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Вестник Таджикского технического университета. 2014. Т. 2. № 26. С. 28-32.

8. Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Чубыкин А.С., Кожевников А.С. Анализ применения жидкостного промежуточного слоя для снижения адгезии грунта к металлическим поверхностям рабочих органов землеройных машин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 189-195.

9. Зеньков С.А., Жидовкин В.В., Нечаев А.Н. Снижение адгезии грунтов с помощью ремонтно-восстановительных составов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2010. Т. 2. С. 127-131.

10. Зеньков С.А., Курмашев Е.В., Елохин А.В., Дэлэг Д. Перспективы применения гибких нагревательных ленточных элементов для снижения адгезии грунта к рабочим органам ковшового типа // Механики XXI веку. 2009. № 8. С. 164-167.

Development trends of methods of reduction of ground adhesion to buckets of excavators on competitive groups

Zenkov S.A.[a], Abdukunduzov A.V.[b]

Bratsk State University, 40, Makarenko St., Bratsk, 665709, Russia
[a]mf@brstu.ru, [b]regar.kahor@gmail.com

Key words: methods to reduce, adhesion of soils, the dynamics of patenting, the dynamic factor

This article identified promising ways to reduce the adhesion of soil to the excavator bucket by competing groups on the basis of the analysis of patent information. The technique of analysis performed grouping of patents in areas obtained mathematical models and their statistical characteristics. The analysis procedure includes: preliminary study of patent information in order to identify the main directions (competing groups) of methods and devices for reducing the adhesion of soils to buckets of excavators; Patent search, compilation of information files of copyright certificates and patents for each direction; Mathematical processing of static data and obtaining functions – mathematical models, approximating the corresponding arrays of information on the dynamics of patenting; A comparative analysis of functions in order to determine the dominant direction and to identify the prospects for each direction. Patterns of patenting dynamics are constructed.

УДК 629.111

Совершенствование гидропривода для условий крайнего севера

Казимиренок А.А.[1,a], Федоров В.С.[1]
[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]Kazimirenok-a@yandex.ru

Ключевые слова: гидропривод, гидробак, теплообменник, змеевик

В статье рассмотрен вопрос повышения работоспособности и эффективности гидропривода в условиях низких температур. Так как гидропривод широко применяется в самой разной лесозаготовительной и строительной технике в суровых климатических условиях Сибири, Крайнего Севера. Так же рассмотрены факторы, влияющие на работоспособность и эффективность работы гидропривода. Проблема заключается в том, что при воздействии низких температур на гидропривод резко ухудшаются его показатели, что может привести к поломке гидропривода и дальнейшему простою техники. Нами было предложено решение, установить в гидравлический бак устройство для предпускового разогрева рабочей жидкости. Оно состоит из двух частей: первая часть – автономный жидкостный нагревательный прибор, вторая часть – теплообменник. В статье рассмотрен принцип работы теплообменника. При использовании рассмотренного устройства можно добиться повышения работоспособности и эффективности работы гидропривода в условиях низких температур.

В настоящее время гидропривод широко применяется в самой разной лесозаготовительной и строительной технике, в том числе и в условиях пониженных температур, в суровых климатических условиях Сибири, Крайнего Севера и Северо-Востока. Для этих регионов характерны низкие температуры в течение длительного периода, вечномерзлые грунты и обильные снегопады с сильным ветром.

Факторы, определяющие надежность работы гидропривода в условиях низких температур: 1. Увеличение вязкости рабочей жидкости при понижении температуры; 2. Конденсация влаги в гидросистеме; 3. Пуск гидросистем в условиях низких температур; 4. Выбор материалов.

Низкая температура окружающей среды значительно повышает вязкость рабочей жидкости после длительного перерыва в работе (до нескольких часов). Например, вязкость некоторых сортов гидравлических масел увеличивается в несколько сотен раз при понижении температуры до -60C^0. При воздействии низких температур также увеличиваются потери давления в системе, пуск гидросистемы затрудняется, стабилизация теплового режима работы гидросистемы становится более продолжительной.

При низкой температуре окружающей среды и нагретом масле в баке происходит конденсация влаги из воздуха. Вода может попасть в масло, а затем и в гидроаппаратуру. Присутствие воды в масле вызывает коррозию элементов гидросистемы, кроме того, значительно увеличивается температура застывания рабочей жидкости. Поэтому масло следует доставлять в герметичной таре, а также стараться, чтобы при заливке в гидросистему не попадала вода. Гидропривод необходимо полностью заполнять маслом и использовать эластичные компенсаторы для компенсации изменения объема рабочей жидкости при повышении температуры масла в процессе работы. Также гидробаки должны быть оборудованы отстойниками для сбора воды и устройствами для слива конденсата. Необходимо периодически отвинчивать сливные пробки и освобождать систему от конденсата.

В гидроприводах, работающих при пониженных температурах, при пуске и в начальный период работы значительно возрастают потери давления в трубопроводах (до 20 раз по сравнению с нормальными температурными условиями). Для уменьшения потерь давления рекомендуется максимально уменьшить протяженность трубопроводов, сократить число изгибов и соединений. Снижение давления вызывает недостаточное заполнение рабочего объема насоса, состояние которого оказывает огромное влияние на работу гидросистемы в це-

лом. Необходимо обеспечивать принудительную подпитку насоса или даже устанавливать его непосредственно в гидробаке. Также рекомендуется устанавливать гидравлические насосы таким образом, чтобы всасывающее отверстие насоса располагалось не менее чем на 50 см ниже наименьшего уровня масла в гидробаке.

Пуск насосов в условиях низких температур должен производиться при постепенном повышении давления рабочей жидкости до номинального с выдержкой при давлении 10 МПа в течение 1…2 мин. Чтобы сократить время выхода гидросистемы на установившийся тепловой режим, которое в зависимости от протяженности трубопроводов может составлять порядка 1-2 часов, рекомендуется обеспечивать теплоизоляцию гидробаков и трубопроводов, также возможно обеспечивать дополнительный подогрев рабочей жидкости в момент пуска. Подогрев рабочей жидкости в период пуска осуществляется путем пропускания всей рабочей жидкости через предохранительный клапан при номинальном рабочем давлении.

Следует также обращать внимание на выбор уплотнений и рукавов высокого давления. Низкая температура эксплуатации приводит к деформации изделий и нарушению их физико-химически свойств – пластичности, объема, линейных размеров и т.п. В связи с этим возникают разрывы резинометаллических и резинотканевых гидравлических шлангов, а резиновые уплотнения теряют свои свойства. Поэтому при проектировании гидросистем, предназначенных для работы в условиях низких температур, крайне важно правильно подобрать элементы гидросистемы, марки гидравлических масел, подходящие уплотнения и рукава высокого давления. Опыт эксплуатации машин с гидроприводом в условиях Крайнего Севера, в Якутии и на Дальнем Востоке показал, что 60% отказов связано с уплотнениями.

Для того чтобы повысить работоспособность и эффективность машины в условиях низких температур, предлагается модернизация гидропривода машины, которая заключается в установке в гидросистему устройства для предпускового разогрева рабочей жидкости. Она позволит в короткие сроки подготовить гидросистему машины к устойчивому пуску в условиях низких температур окружающего воздуха (ниже минус 40°С) (рисунок 1).

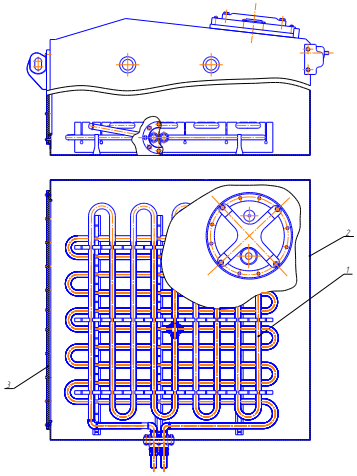


Рис. 1. Гидравлический бак:
1 – Змеевик, 2 – Бак гидравлический, 3 – Крышка бака

Устройство монтируется в гидравлический бак и состоит из двух частей:

Первая часть – автономный жидкостный нагревательный прибор, работающий на дизельном топливе, позволяющий обеспечить достаточную температуру, необходимую для разогрева рабочей жидкости. Схема его подключения представлена на рисунке 2. Вторая часть – теплообменник расположенный на дне гидравлического бака, который обеспечивает достаточно быструю и эффективную передачу теплового потока от нагревателя к рабочей жидкости. Более того, из-за невысокой температуры на поверхности тепловых труб (до 100 °С) исключается явление облитерации и термической деструкции рабочей жидкости.

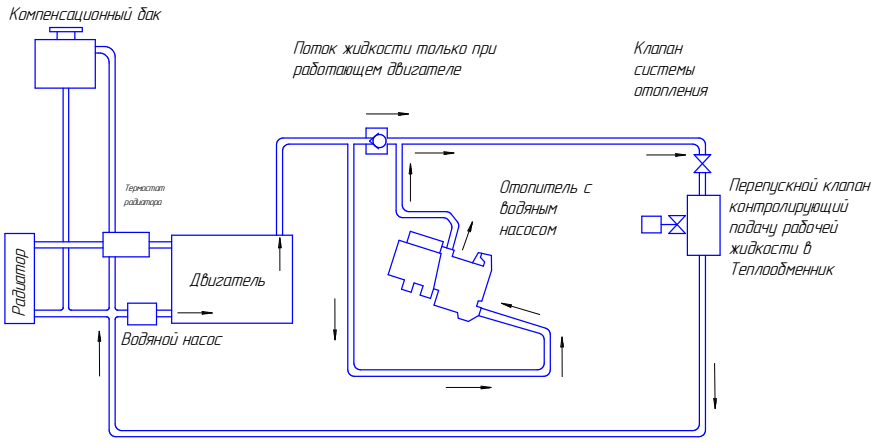


Рис. 2. Гидравлическая схема подключения отопителя

Теплообменник представляет собой змеевик, который проложен двумя ярусами на дне бака, т.е. одна часть змеевика поверх другой части, таким образом, змеевик способен поддерживать температуру греющей жидкости за счет «самопрогрева». В зависимости от греющей жидкости (теплоносителя), можно выбрать разный материал змеевика (таблица 1). Эту систему разогрева можно сделать автоматической. Для этого необходимо дополнительно установить в бак температурный датчик, а так же установить реле времени в цепь сопротивления от аккумуляторной батареи

Таблица 1

Совместимость материала корпуса и теплоносителя тепловой трубы

Материал	Теплоноситель			
	Вода	Фреон	Ацетон	Спирт
Медь	+	+	+	+
Алюминий	-	+	+	-
Нержавеющая сталь	-	+	+	+
Углеродистая сталь	-	+	+	-

Принцип работы теплообменника:

Греющая жидкость (антифриз) проходя через автономный жидкостный нагревательный прибор, достигает рабочую температуру и поступает в змеевик. Все части змеевика прогреваются, в результате теплообмена прогревается гидравлическое масло находящееся в гидравлическом баке.

В контур змеевика антифриз поступает с температурой +70 ˚С, при выходе температура опускается до +50 ˚С, благодаря конструкции змеевика температура не опускается ниже, что вполне вероятно при температуре окружающей среды -40 ˚С и отсутствии теплоизоляции. В итоге, гидравлическое масло, находящееся в баке, на выходе из змеевика имеет рабочую температуру.

Вывод: При использовании рассмотренного теплообменника в системе термостатирования рабочей жидкости, можно добиться повышения работоспособности и эффективности гидропривода машин в условиях низких температур.

Литература:

1. Каверзин С.В., Лебедев В.П., Сорокин Е.А. Обеспечение работоспособности гидравлического привода при низких температурах. – Красноярск: 1997. – 240с.

2. Каверзин, С. В. Проектирование гидробаков для строительных и дорожных машин / С. В. Каверзин // Строительные и дорожные машины, 1982. – № 8. – С. 24–25.

3. Башта, Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

Improvement of the hydraulic drive for the conditions of the Far North

Kazimirenok A.A.[1,a], Fedorov V.S.[1]
1Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]Kazimirenok-a@yandex.ru

Key words: hydraulic drive, hydraulic tank, heat exchanger, coil

The article considers the issue of increasing the efficiency and efficiency of the hydraulic drive in conditions of low temperatures. Since the hydraulic drive is widely used in a variety of logging and construction equipment in the harsh climatic conditions of Siberia, the Far North. The factors influencing the efficiency and efficiency of hydraulic drive operation are also considered. The problem is that when the temperature is low, the hydraulic drive deteriorates sharply, which can lead to breakdown of the hydraulic drive and further downtime of the equipment. We proposed a solution install in the hydraulic tank a device for preheating the working fluid. It consists of two parts: the first part - an autonomous liquid heating device, the second part - a heat exchanger. The principle of the heat exchanger operation is considered in the article. When using the device in question, it is possible to increase the efficiency and efficiency of hydraulic drive operation in low-temperature conditions.

УДК 621.86

Способы подготовки прочных горных пород к выемке в горном деле и строительстве

Сапегин Ю.К.[a]

Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия
[a]yksapegin@mail.ru

Ключевые слова: буровзрывные работы, механическое рыхление, карьерные комбайны, нетрадиционные способы разрушения

Подготовка прочных пород к выемке с применением буровзрывных работ имеет ряд недостатков, ограничивающих применение данного способа. С появлением мощных бульдозерно-рыхлительных агрегатов, гидравлических экскаваторов и карьерных комбайнов стало возможным с относительно высокой производительностью вести механическое рыхление массивов горных пород. Продолжаются исследования по возможности совершенствования механических способов подготовки прочных пород к выемке, в частности путем ослабления массива дополнительными выработками в виде шпуров или щелей. Разработаны нетрадиционные способы с подготовки прочных пород к выемке с применением поверхностно-активных веществ и газогенераторов давления шпуровых. Безвзрывные способы обеспечивают безопасную выемку вблизи сооружений, железных и автомобильных дорог, особо охраняемых территорий. Применение механических способов выемки позволяет эффективно разрабатывать прочные горные породы в условиях ограничения ведения буровзрывных работ.

Введение. В настоящее время для подготовки к выемке прочных горных пород чаще всего применяют буровзрывные работы (БВР). Взрыв – быстрое химическое разложение вещества, сопровождающееся выделением большого количества энергии, сжатых газов и образованием ударной волны, оказывающих разрушающее действие на окружающую среду. Давление газов достигает нескольких тысяч мегапаскалей, а температура – нескольких тысяч градусов. Главное преимущество взрыва при разработке прочных горных пород – эффективное дробление. Основные недостатки: опасность взрывных работ для людей, механизмов и сооружений. Опасности могут быть следующие: удар воздушной волны большой силы и сейсмические колебания; осколки взрываемой породы; большое количество ядовитых газов; чувствительность взрывчатых веществ (ВВ) к внешним воздействиям и к детонации. Сейсмические воздействия, из-за которых происходят колебания почвы, обычно не создают непосредственной опасности для человека, но вредно отражаются на зданиях и сооружениях, на-

ходящихся в опасной по сейсмическому воздействию зоне, вследствие чего они могут разрушаться. Разлет осколков представляет серьезную опасность не только для работающих людей и окружающего населения, но и для оборудования, зданий и сооружений. Образование ядовитых газов при взрывах (окиси углерода, окислов азота, сероводорода и др.), скопление их в больших количествах создают опасность отравления человека, особенно в подземных выработках при совместной разработке.

Ограничения по ведению взрыва. Применять разупрочнение пород с помощью взрыва в строительстве и горном деле невозможно в следующих случаях: в условиях обводненных, неустойчивых пород; в условиях строительства вторых железнодорожных путей на участках интенсивного движения поездов; на участках уширения полотна автомобильных дорог; вблизи сооружений и населенных пунктов; в заповедниках и особо охраняемых территориях; на местах, где ужесточены требования по БВР, шуму и вибрациям.

В связи с заметным увеличением объемов строительных работ в России, увеличился спрос на природный облицовочный камень, а в условиях ограниченного количества разрабатываемых месторождений камня высокой декоративности – к потребности в «щадящих» ресурсосберегающих технологиях его добычи [1]. Ведение буровзрывных работ нежелательно, если участок или карьер имеет небольшую площадь и ограниченный объем горной массы, это позволит избежать строительства специализированных складов ВВ, покупку смесительно-зарядных машин, затрат на ликвидацию отказов взрывов и т.д.

Результаты исследований. Альтернативой взрывной подготовке служат механические способы разупрочнения. Механическими средствами разрушения являются: специальный ковш экскаватора или его навесное оборудование, фреза выемочно-погрузочного комбайна, тракторный рыхлитель. Механические способы рыхления в ряде случаев эффективнее буровзрывного благодаря своей простоте, низкой себестоимости и большей безопасности работ [2-3].

Наиболее распространено рыхление тракторными рыхлителями. Такой рыхлитель представляет собой мощный гусеничный трактор, оборудованный устройством с зубьями, число которых может быть от одного до пяти, однозубые рыхлители предназначены для разработки прочных пород [4-5]. В последнее время широкое распространение получили бульдозерно-рыхлительные агрегаты, которые состоят из базовой машины, бульдозерного оборудования, установленного спереди, и рыхлительного оборудования, смонтированного сзади. Рыхлитель в виде рамы с зубьями является навесным оборудованием к гусеничным тракторам. После разрыхления массива выемка горной массы может вестись экскаваторами, скреперами или погрузчиками [6-8].

Специально для условий, с ограничениями по взрывным работам немецкая фирма Wirtgen разработала серию комбайнов Surface Miner [9]. В США, недалеко от города Сан Антонио, было необходимо в холмистой местности выполнить работы по удалению скальных пород в количестве около 30 тыс. $м^3$, представленных крепким известняком (до 120 МПа), что позволило бы пройти трассу автодороги с безопасными уклонами. Причем часть материала должна была быть использована в качестве засыпки. Учитывая, что трасса проходила через застроенную территорию, использование буровзрывных работ было невозможно, для разработки пород был применен комбайн модели 3500 SM. Требуемые объемы были выполнены в течение пяти недель. Использование карьерных комбайнов позволяет исключить вредное влияние взрывных волн на массив [10] и способность безвзрывной разработки массива позволяют создавать выемки точного профиля с устойчивыми откосами, что приводит к сокращению объемов строительства. Одновременно образуемая площадка имеет идеальную точно спрофилированную поверхность без трещин, что снижает расход бетона при строительстве. Кроме этого обеспечивается безопасность ведения работ и сокращается отрицательное воздействие на окружающую среду.

В силу ряда объективных преимуществ, в настоящее время для разрушения как породного массива, так негабаритов активно применяют гидромолоты, навешиваемые в качестве сменного рабочего органа на гидравлические экскаваторы. При этом нет технических ог-

раничений для навески гидромолотов на экскаваторы с рабочим оборудованием «обратная» или «прямая лопата». Оборудование «обратная лопата» имеет более широкий диапазон работы ниже уровня стояния экскаватора. Эффективность работ по разрушению кусков и блоков горных пород гидромолотом зависит от многих факторов: размеров, формы и структуры, крепости и твердости, абразивности материала, положения пространстве, энергии удара молота и опыта машиниста [2].

Продолжаются исследования по возможности совершенствования механических способов подготовки прочных пород к выемке. Предлагается способ подготовки сезонно промерзших пород уступов к выемке одноковшовыми экскаваторами [11]. Способ заключается в нарезании щелей на рабочей площадке и борту уступа на глубину промерзания породы, расстояние между нарезаемыми щелями делается несколько меньшим ширины ковша выемочного экскаватора. После нарезания щелей мерзлый массив разбирается ковшом экскаватора, с выламыванием мерзлой породы ослабленной щелями.

Известен способ предварительного ослабления блока скальных и полускальных пород путем одновременного массированного бурения в нем скважин с максимальной плотностью по всей площади блока с помощью многоштангового бурильного агрегата (МБА). Для этого подъемным краном многоштанговый бурильный агрегат опускается на поверхность подготавливаемого блока массива, при этом количество скважин в каждом конкретном случае определяют экспериментально. Рабочий цикл начинают с одновременного включения в работу всех буровых штанг, после чего, управляя гидродомкратами, опускают МБА до момента соприкосновения его рабочих органов с поверхностью блока. После погружения рабочих органов до заданной отметки блока гидродомкратами поднимают МБА над блоком и далее переносят его подъемным краном на следующий участок блока уступа и процесс повторяется. В результате графических проработок установлено, что на площади, равной одному квадратному метру, можно равномерно разместить до 40 перфораторов для бурения скважин диаметром 60мм и глубиной 3м. При этом поперечные размеры межскважинных целиков составляют порядка 100×100мм, что наглядно свидетельствует о достаточной предварительной «рыхлости» блока и его непрочности для разрушения машинными способами, например, экскаваторами, драглайнами, роторными экскаваторами или бульдозерами.

Существуют нетрадиционные методы подготовки прочных горных пород к выемке, основанные на новых принципах [12-13]. Например, на разрезе «Талдинский» проводились комплексные технологические и эксплуатационные испытания экскаватора КСМ-2000Р в изменяющихся горнотехнических и климатических условиях с обработкой массива поверхностно-активными веществами (ПАВ). В течение двух суток после обработки массива происходил процесс пропитки горного массива. Затем зона экспериментального блока, обработанная водными растворами ПАВ, отрабатывалась КСМ-2000Р. Вследствие предварительной физико-химической обработки горного массива, существенно сократился выход крупнокусковатого материала, значительно (в среднем на 23%) уменьшилась энергоемкость процесса экскавации [12]. Разработан способ подготовки прочных горных пород к выемке с использованием газогенераторов давления шпуровых (ГДШ), объединяющий положительные стороны механических и взрывных способов [1]. ГДШ обладает способностью создавать динамическое давление газов только в замкнутом пространстве шпура, плотного заполненного песком. Применение ГДШ для добычи блочного камня в карьерах является безопасным в токсиколого-гигиеническом отношении, ГДШ надежно работают в обводненных шпурах, благодаря герметичному пластмассовому корпусу. Темп нарастания давления в шпуре поддается плавному регулированию введением в окислитель разного количества горючего, что позволяет учитывать конкретные горно-геологические условия карьеров и физико-механические свойства добываемого камня.

Выводы. Развитие техники, совершенствование технологии и организации горных работ приводят к коренным изменениям в горной промышленности и строительстве. Опасность ведения буровзрывных работ, а также отсутствие возможности их производства в некоторых местах и условиях способствует развитию механических и нетрадиционных спосо-

бов выемки прочных горных пород. Следует стремиться заменять буровзрывные методы выемки горных пород механическими способами, так как они более безопасны для окружающей среды, сооружений, жизни человека.

Литература:

1. Березуев Ю.А. Применение шпуровых газогенераторов давления на карьерах блочного камня // Горный журнал. 2008. №1. С. 50-53.
2. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Использование горного оборудования для механического разрушения скальных и полускальных пород // Горная промышленность. 2014. №2. С. 104-107.
3. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинцев В.С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // Горный журнал. 2013. №2. С. 30-34.
4. Ю.И. Анистратов, К.Ю. Анистратов, М.И. Щадов. Справочник по открытым горным работам, 2010. – 700 с.
5. К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виницкий, Н.Н. Мельников и др. Справочник. Открытые горные работы. – М. Горное бюро, 1994. С. 317-318.
6. Шемякин С.А., Матвеев Д.Н., Чебан А.Ю. Экскаватор одноковшовый с рабочим органом двухцелевого назначения // Горное оборудование и электромеханика. 2015. №3. С. 15-19.
7. Чебан А.Ю., Шемякин С.А. Обоснование параметров скреперов с подгребающим устройством внутри ковша // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. №2. С. 338-343.
8. Чебан А.Ю. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов в средства водного транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 5 (33). С. 43-47.
9. Панкевич Ю.Б., Шимм. Б. Использование карьерных комбайнов фирмы Wirtgen при безвзрывной разработке скальных пород в строительстве // Горная промышленность. 1999. №1. С. 18-21.
10. Чебан А.Ю. О целесообразности внедрения послойно-полосовых технологий при разработке месторождений цементного сырья в Дальневосточном регионе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. - №10. С. 53-58.
11. Чебан А.Ю., Соболев А.А. Разупрочнение поверхностного слоя уступов при сезонном промерзании породы // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. №4. С. 113-119.
12. Кузнецов А.Г., Штейнцайг Р.М., Воронков Г.Я. Шейндеров А.И., Александров А.А. Применение методов физико-химического разупрочнения массивов крепких горных пород при работе мшин типа КСМ // Горная промышленность. 1997. №4. С. 3-7.
13. Хосоев Д.В. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочность мерзлых пород Кангаласского месторождения // Журнал «Горная промышленность» 2013. №5. С. 88
14. Патент №2545557 // Ковчугай А.Г. Способ подготовки горных пород к выемке для добычи угля открытым способом.

Methods of explosive excavation of solid rock in mining and construction

Sapegin Y.K.[a]

Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Habarovsk, 680000, Russian Federation
[a]yksapegin@mail.ru

Key words: drilling and blasting, mechanical loosening, quarry harvesters, non-traditional methods of destruction

The preparation of strong rocks for excavation using drilling and blasting operations has a number of disadvantages that limit the application of this method. With the advent of powerful bulldozer-loosening aggregates, hydraulic excavators and mining combines it became possible to conduct mechanical loosening of rock massifs with relatively high productivity. Studies are continuing on the possibility of improving the mechanical methods for preparing strong rocks for excavation, in particular by weakening the massif with additional workings in the form of holes or slots. Unconventional methods have been developed with the preparation of solid rocks for excavation using surfactants and gas pressure generators for spur. Non-explosive methods ensure safe excavation near structures, railways and highways, specially protected areas. The use of mechanical excavation methods makes it possible to effectively develop strong rocks in conditions of limiting drilling and blasting operations.

УДК 625.088

К вопросу назначения амплитудно-частотной характеристики вибросмесителя

Ефремов М.И.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия
imefremov@yandex.ru

Ключевые слова: бетонная смесь, геометрическая форма, вибрационный смеситель, виброактиватор, эффективность использования

В статье рассматривается воздействие на цементобетонную смесь вибрационного импульса. Отмечаются основные факторы, влияющие на качество получаемого продукта и производительность технологического оборудования для производства строительных смесей. Предлагается серия оригинальных конструкций смесительных агрегатов гравитационного действия со встроенным виброактиватором, установленным в центре камеры перемешивания. Целью статьи является оптимизация амплитудно-частотной характеристики внутреннего виброактиватора. Предложена опытная установка для определения рационального времени перемещения бетонной смеси по желобу, наклоненному под углом и установленным на вибрационную площадку, с возможностью изменения амплитуды и частоты вибрационного воздействия. На основе полученных автором экспериментальных данных, предлагается несколько вариантов критериев оценки вибрационного воздействия на бетонную смесь, позволяющих интенсифицировать процесс смесеобразования. Кроме того экспериментально подтверждается эффективность применения предлагаемого решения.

В смесителях свободного (гравитационного) перемешивания в основном проявляются такие виды конвективного смешивания, как перемещение групп частиц из одного положения в другое, внедрение и скольжение слоев; при принудительном смешивании к ним добавляются деформация и истирание порции слоя в результате механического движения рабочих органов [3].

Основным недостатком смесителей свободного и принудительного перемешивания строительных материалов, несмотря на их широкое применение, является весьма слабое протекание диффузионных процессов смешивания на уровне микрообъемов. Это обуславливает при формовании изделий из смесей, приготовленных в подобных смесителях, появление дефектов, концентраторов напряжений и т.п., снижающих их физико-механические свойства [2,5].

Эти задачи решаются при двух стадийном перемешивании, предложенным еще в 30-е годы В.А. Бауманом: 1. Смешивание сухих компонентов; 2. смешивание полуфабриката смеси с вяжущим.

Этот метод нашёл широкое применение за рубежом путем приготовления сухих смесей, например, песка с цементом, которые при добавлении воды на строительных площадках превращаются в высококачественные строительные растворы.

К современным способам интенсификации процессов смешивания можно отнести применение вибрации. В науке и технике принято рассматривать механизм вибрационного воздействия на обрабатываемые среды в двух представлениях: корпускулярном и феноменологическом. Современный уровень технологии бетона и теории твердения вяжущих веществ убедительно свидетельствует о том, что основные свойства бетона являются функцией протекающих в нем физико-химико-механических процессов. В связи с этим, следует воздействовать на свежий бетон средствами физики, химии, механики, или наиболее эффективным из этих средств. Одним из наиболее эффективных методов, повышающих качество бетона, является вибрационная обработка. Важным элементом этой технологии бетона является виброперемешивание смеси, от которого зависит однородность бетона, его прочность, а также структура цементного камня. Плохое перемешивание бетонной смеси не может быть ком-

пенсировано хорошим уплотнением бетона. Активация цементного теста, идущая в процессе виброперемешивания, повышает скорость твердения бетонной массы и прочность изделия, а также улучшает структуру бетона [4].

В связи с этим, в процессе виброперемешивания жесткие бетонные смеси превращаются в пластичные, цементное тесто при вибрационных воздействиях вновь становится клейким, что создаёт условие для обволакивания зёрен заполнителя цементным тестом. К тому же, виброперемешивание устраняет вредное действие глинистых примесей в песке. В результате виброперемешивание способствует хорошей удобоукладываемости жёстких бетонных смесей, вследствие их пластифицирования, и получению цементного камня с тонкокапилярной поровой структурой [2,5]. Определить оптимальную амплитуду колебания, при которой бетонная смесь достигнет максимального тиксотропного разрушения структуры и как будет изменяется вязкость бетонной смеси при изменении амплитуды и частоты колебаний вот главная задача проводимых исследований.

Автором предложен ряд конструкций вибрационных смесителей, относящихся к группе смесителей гравитационного действия. В конструкции встроен внутренний вибратор, интенсифицирующий процесс перемешивания [7,8,9,10]. Вместе с тем необходимо определить оптимальные параметры вибрации – амплитуду и частоты воздействий. С этой целью проведены экспериментальные исследования для определения оптимальных параметров вибрации, при которых структура смеси максимально разрушается и вязкость смеси снижается.

Общий вид экспериментальной установки, на которой проводились исследование, представлен на схеме (рисунок 1). Она состоит из загрузочного окна (1), лоток (2) с углом наклона 6°, пластина (3), вибрационная площадка (4), диаметр трубы, по которой проходит бетонная смесь, равна d = 50 мм. Общая длина l = 1300 мм Экспериментальная установка установлена на вибрационную площадку серии СМЖ-530. Амплитуда изменяется А = 0,15…1,0 мм.

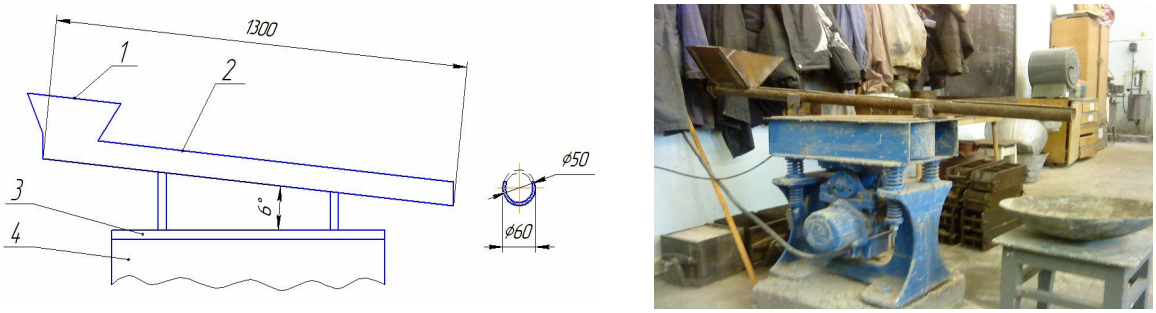


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (металлический лоток)

Таблица 1

Результаты эксперимента

Значение амплитуды колебаний, A, м	Расстояние прохождение бетонной смеси, L=1,3 м, за время t, сек			
	t_1, сек	t_2, сек	t_3, сек	t_4, сек
0,00015	237,2	237,5	237,8	237,5
0,00032	217,4	216,2	216,1	216,57
0,00049	195,7	194,5	194,3	194,83
0,00066	184,5	182,8	182,5	183,27
0,00083	175,8	175,1	175,3	175,4
0,001	173,4	172,6	172,9	172,97

На рисунке 2 показана зависимость $t=f(A)$, из которой видно, что при увеличении амплитуды колебаний свыше 1 мм время протекание бетонной смеси составляет t = 173 сек, т. е процесс стабилизируется.

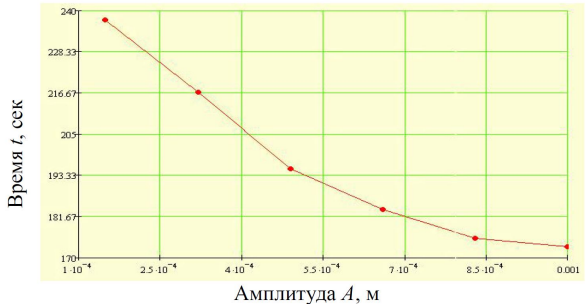


Рис. 2. Зависимость времени от амплитуды $t = f(A)$

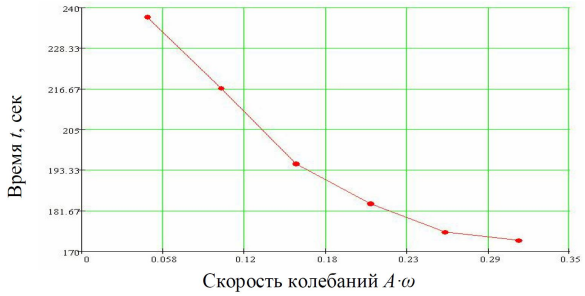


Рис. 3. Зависимость времени от скорости колебаний $t = f(A \cdot \omega)$

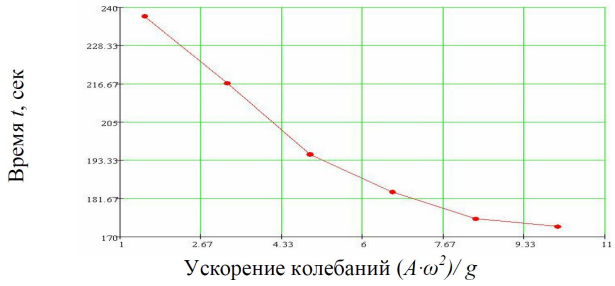


Рис. 4. Зависимость времени от ускорения колебаний $t = f((A \cdot \omega^2)/g)$

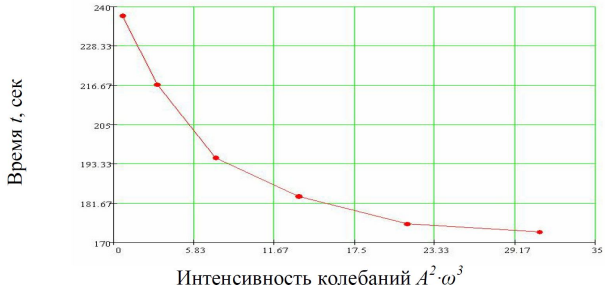


Рис. 5. Зависимость времени от интенсивности колебаний $t = f(A^2 \cdot \omega^3)$

На рисунке 3 показана зависимость $t = f(A \cdot \omega)$, из которой видно, что при увеличении скорости колебаний свыше $A \cdot \omega = 0{,}314$ время протекание бетонной смеси по лотку составляет $t = 173$ сек, т. е процесс протекания бетонной смеси стабилизируется.

На рисунке 4 показана зависимость $t = f((A \cdot \omega^2)/g)$, из которой видно, что при увеличении ускорений колебаний свыше $(A \cdot \omega^2)/g = 10{,}5$ время протекание бетонной смеси по лотку составляет, $t = 173$ сек, т. е процесс протекания бетонной смеси стабилизируется.

На рисунке 5 показана зависимость $t = f(A^2 \cdot \omega^3)$, из которой видно, что при увеличении интенсивности колебаний свыше $(A^2 \cdot \omega^3) = 30{,}96$ время протекание бетонной смеси по лотку составляет $t = 173$ сек, т. е процесс протекания бетонной смеси стабилизируется.

Математическое моделирование процесса смесеобразования является еще не решенной однозначно задачей. Прогнозирование результатов процесса зависит от точности математического описания, которое в свою очередь зависит от числа параметров, характеризующих процесс, и от того, каким образом и насколько точно они будут определены и как взаимоувязаны. Разные подходы к моделированию процесса предусматривают свои приоритетные значимости параметров, влияющих на процесс смешения в вибрационном аппарате. Большинство исследователей сходятся на том, что первостепенное воздействие на процесс оказывают режимные характеристики [1, 2, 3] амплитуда и частота колебаний. Следует иметь в виду, что каждый из указанных параметров может использоваться как в переменном режиме, так и в постоянном. В случае необходимости использования дополнительных режимных параметров их определение возможно с помощью вычислительного эксперимента, на базе главных: амплитуды и частоты.

Анализ результатов, полученных экспериментальным путем, показал, что наилучшим критерием оценки влияния амплитуды и частоты на тиксотропное разжижение цементобетонной смеси является критерий $(A \cdot \omega^2)/g$ [1]. Данный критерий позволяет использовать его в математических моделях, описывающих процессы вибрационного перемешивания, поскольку он является величиной безразмерной и учитывает одновременное влияние амплитуды и частоты.

Литература:

1. Кузьмичев В.А. Методы моделирования и проектирования вибрационных смесительных машин: дис. д-ра. техн. наук / В.А. Кузьмичев. – Л., 1989. – 397 с.
2. Гольдштейн, Б.Г. Выбор параметров глубинных вибраторов для уплотнения бетона / Б.Г. Гольдштейн. – М., 1968, – 66 с.
3. Ефремов, И.М. Современные технологии интенсификации процессов перемешивания бетонных смесей / И.М. Ефремов, Д.В. Лобанов, К.Н. Фигура. – Строительные и дорожные машины. – 2011. - №1. – с. 37-41.
4. Ефремов, И.М. Механическая активация бетонных смесей при интенсификации процессов / И.М. Ефремов, Д.В. Лобанов, К.Н. Фигура. – Механизация строительства. – 2011. - №2. – с. 6-8.
5. Ефремов, И.М. Вибрационные методы перемешивания бетонных смесей в аспекте Вибрационные методы перемешивания бетонных смесей в аспекте патентно-информационного анализа / И.М. Ефремов, Д.В. Лобанов, К.Н. Фигура, И.В. Комаров, Р.Е. Никифоров. – Механизация строительства. – 2011. - №4. – с. 6-10.
6. Патент РФ на полезную модель RU 156 390 U1 (RU), МПК B28C 5/14, 2006.01 Гравитационный смеситель / Ефремов М.И., – № 2015111764/03; заявл. 31.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл №31; приоритет 31.03.2015.
7. Патент РФ на полезную модель RU 156 398 U1 (RU), МПК B28C 5/22, 2006.01 Гравитационный смеситель / Ефремов М.И., – № 2015111693/05; заявл. 31.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл №31; приоритет 31.03.2015.
8. Патент РФ на полезную модель RU 156 528 U1 (RU), МПК B28C 5/22, 2006.01 Гравитационный смеситель / Ефремов М.И., – № 2015111773/05; заявл. 31.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл №31; приоритет 31.03.2015.
9. Патент РФ на полезную модель RU 156 654 U1 (RU), МПК B28C 5/22, 2006.01 Гравитационный смеситель / Ефремов М.И., – № 2015111750/05; заявл. 31.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл №31; приоритет 31.03.2015.

To the problem of assigning an amplitude-frequency characteristic of a vibrating mixer

Efremov M.I.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaya, 29, Saint-Petersburg, Russia
imefremov@yandex.ru

Keywords: analysis, geometric shape, vibratory mixer, vibroaktivator, efficiency of use

The article discusses the impact of cement concrete mixture vibration pulse. Pointing out the main factors affecting the quality of the product and productivity of process equipment for manufacture of building mixes. Offers a series of original designs mixing units of the gravitational action with built-in vibroactivity installed in the center of the chamber mixing. The purpose of this paper is to optimize the amplitude-frequency characteristics of the internal vibroactivity. The proposed experimental setup for determining the rational travel time of the concrete mix in the chute is tilted and installed on a vibration platform, with changes in the amplitude and frequency of vibration exposure. On the basis of the obtained experimental data, there are several possible criteria for the assessment of vibration impact on the concrete mix, allowing to intensify the process of mixing. In addition, we experimentally confirmed the efficacy of the proposed solution.

УДК534.01;622.24.053

Исследование шероховатости поверхности в зависимости от жесткости бетонной смеси

Файзов А.Х[1,a]., Приходько А.С[2,b]., Герасимов С.Н[3,c]., Мамаев Л.А.[4,d]

ФГБОУ ВПО Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]azamat.fayzov@mail.ru,[b]89086450954@mail.ru,[c]sdm_gerasimov@rombler.ru,[d]pro_uche@brtsu.ru

Ключевые слова: шероховатость, жесткость смеси, бетонная смесь, вибровоздействие

Анализ графиков, представленных на рисунках 1 – 3 показывает, что в наибольшей степени рост давления [1] рабочего органа на бетонную поверхность способствует снижению шероховатости поверхности при фиксации факторов X_2, X_3, X_4 на нулевом уровне значений и в этом случае шероховатость достигает своего минимального значения 0,6 мм. Интенсивность снижение шероховатости при возрастании давления от -1 до +1 в этом случае наиболее высока и составит величину порядка 0,2 мм. Вместе с тем, необходимо отметить, что вибрация рабочего органа оказывает положительный результат как регулирующий фактор, чье положительное действие нуждается в подстройке параметров движения рабочих головок. При проведении эксперимента [2] были получены данные, характеризующие влияние давления на бетонную поверхность при действии вибрации (50 Гц) и при статическом приложении усилий через механизм подъема - опускания каретки (в пределах 150 Н).

Введение. На рисунках 1 – 3 представлены графики зависимости уровня шероховатости от величины жесткости бетонной смеси, обозначенной через X3.

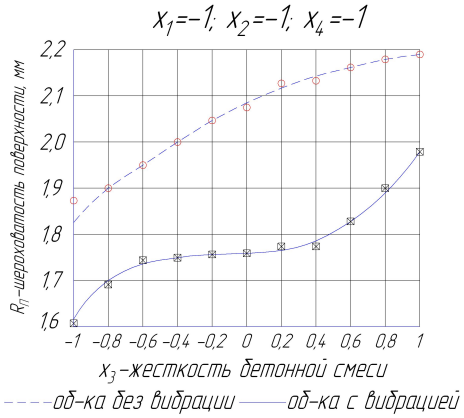


Рис. 1. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности приварьировании жесткости бетонной смеси и значениях остальных параметров на нижнем уровне

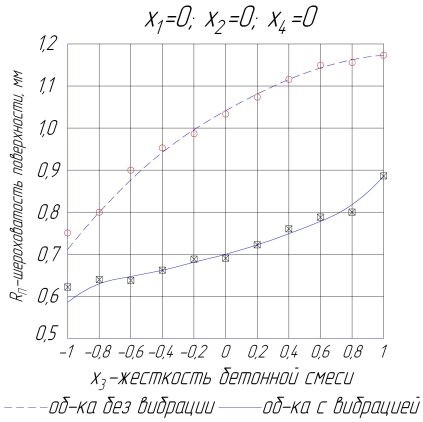


Рис. 2. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности при варьировании жесткости бетонной смеси и значениях остальных параметров на нулевом уровне

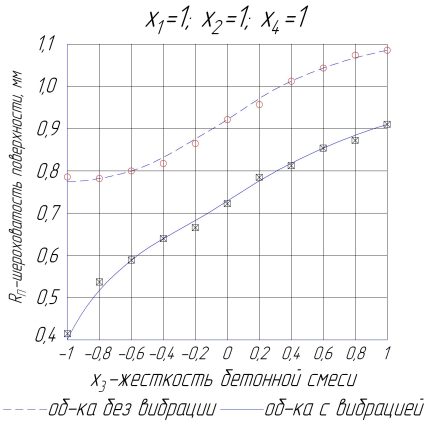


Рис. 3. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности при варьировании жесткости бетонной смеси и значениях остальных параметров на верхнем уровне

Отметим следующее:

1. При фиксации факторов давления, [3]интенсивности вибровоздействия и заглаживающей способности на минимальном уровне значений (рисунок 1), качество обработки поверхности падает при возрастании жесткости бетонной смеси в кодированных значениях от -1 до -0,6. Прирост шероховатости составляет 0,12 мм. В дальнейшем, при возрастании жесткости смеси от -0,6 до +0,2 наблюдается умеренный прирост шероховатости обработанной поверхности. Последующее увеличение жесткости смеси от +0,2 до +1,0 оказывает наиболее значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности и ее абсолютный прирост на этом участке составляет 0,2 мм.

2. При фиксации факторов X1, X2, X4 на нулевом значений (рисунок 2) имеет место та же тенденция, что и при минимальных уровнях значений факторов. Однако, в данном случае, при повышении жесткости бетонной смеси в кодированных значениях от -1 до +1 прирост шероховатости характеризуется меньшей интенсивностью. Абсолютное возрастание шероховатости составляет величину порядка 0,31 мм.

3. При фиксации факторов X1, X2, X4 на верхнем уровне значений (рисунок 3) и изменении жесткости бетонной смеси в сторону ее увеличения, шероховатость обработанной поверхности возрастает довольно интенсивно. При этом наибольший рост шероховатости наблюдается на участках роста жесткости бетонной смеси от -1 до -0,6 и на участке от +0,2 до +0,8 в кодированных значениях.

Выводы: Анализ данной серии графических зависимостей позволяет сделать вывод о значительном влиянии жесткости бетонной смеси на величину шероховатости обработанной поверхности при фиксации остальных факторов на различных уровнях значений.

Литература:

1. Герасимов С.Н., Соколов А.П., Федоров В.С., Дубынина И.А., Багаудинов И.Б. Рабочий орган заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками // Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. 440с

2. Соколов А.П., Федоров В.С., Багаудинов И.Б., Василюк О.Э. Определение заглаживающей способности рабочего органа заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками // Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. 440с.

3. Соколов А.П., Федоров В.С., Багаудинов И.Б., Василюк О.Э. Описание лабораторного стенда и метода экспериментальных исследований рабочего органа заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками// Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. 440 с.

Study roughness on the hardness concrete-mixture

Fayzov A.H.[1a], Prikhodkov A.S.[2,b], Gerasimov S.N.[3,c], Mamaev L.A.[4,d]

Bratsk State University, st . Makarenko 40, Bratsk , Russia
[a]azamat.fayzov@mail.ru,[b]89086450954@mail.ru,[c]sdm_gerasimov@rombler.ru,[d]pro_uche@brtsu.ru

Keywords: roughness, hardness mixture of concrete, vibration exposure

Analysis of the diagrams presented in Figures 1 - 3 shows that the greatest increase in pressure [1] working body on the concrete surface reduces the surface roughness when fixing X2 factors, X3, X4 at zero value and in this case the surface roughness reaches its minimum value 0.6 mm. The intensity reduction of roughness with increasing pressure from -1 to 1 in this case is the highest and is of the order of 0.2 mm. At the same time, it is necessary by-note that the vibration of the working body has a positive result as a regulatory factor-conductive whose positive action needs to be customized motion parameters rabochih heads. In the experiment [2] The data were obtained, describing the impact of pressures, of the concrete surface by the action of vibration (50 Hz) and static under-Annex efforts through the lifting mechanism - lowering carriage (within 150 N).

УДК 666.97.031

Быстросъёмное устройство (БСУ) рабочих органов на базе экскаватора

Хричков А.В.

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
eclips51@mail.ru

Ключевые слова: ковш, цилиндр, оборудование, шток, пружина

В статье рассмотрена новая конструкция быстросъемного устройства (БСУ), на примере экскаваторного оборудования. Конструкция данного БСУ позволяет обеспечивать мобильную смену рабочих органов в любых природно-климатических условиях, а также реализует возможность его эксплуатации без дополнительных вспомогательных операций при монтаже/демонтаже сменных рабочих органов машины. Предлагаемая конструкция БСУ обладает простотой в изготовлении и универсальностью, что позволяет реализовать возможность его установки на другие типы машин для земляных работ. БСУ имеет эффективный гидравлический привод механизма фиксации, что позволяет надежно закрепить рабочий орган, устанавливаемый на данный экскаватор, при этом больших изменений, как в гидравлическом приводе машины при монтаже устройства, так и в параметрах крепления рабочего органа не будет.

Одним из основных направлений экономического развития Российской Федерации является повышение эффективности капитального строительства, освоение значительных объемов работ, направленных в первую очередь на реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий, а также на дальнейшее развитие и благоустройство городского хозяйства. В то же время производство строительных работ в городских условиях сопряжено с дополнительными трудностями, связанными с необходимостью выполнять различные трудоемкие операции, особенно при производстве земляных работ в зимний период.

Для успешного строительства в этих условиях необходимо иметь машины и оборудование с хорошими мобильными и транспортными качествами, способные эффективно выполнять работу в стесненных условиях.

Экскаваторы являются наиболее распространенными землеройными машинами. В настоящее время развитие гидрофицированных экскаваторов идет по пути создания большого числа сменных рабочих органов, что повышает их универсальность. Поэтому становятся возможными такие работы, как, например, прокладка трубопроводов, которые обычно осуществлялись несколькими видами машин, производить одним экскаватором, это даст значительный экономический и технический эффект.

В настоящее время ряд моделей одноковшовых гидравлических экскаваторов уже выполнены с возможностью оснащения таким сменным рабочим оборудованием.

Из уровня техники известны различные устройства, реализованные на данной основе.

Так, например, известно быстросъемное устройство (патент SU 23298). Достоинством устройства является обеспечение возможности навески любого вида стандартного рабочего органа без его механической доработки или переделки присоединительных элементов. Недостаток устройства в том, что привод механизма запирания устройства выполнен ручным и оснащен подпружиненным двухпозиционным фиксатором. При частой замене рабочего органа повлечет за собой к износу двухпозиционного фиксатора, что скажется на выходе его из строя.

Известно быстросъемное устройство (патент SU 386076). Достоинством устройства является обеспечение ускоренного монтажа и демонтажа ковша с рукоятью, переходник, которого выполнен с откидным захватом, установленным с возможностью фиксации его относительно ковша, например, пальцами, и смонтированным на нем блоком ковшевого полиспаста. Недостатком устройства является трудоемкость замены рабочего органа, которое связа-

но с содержанием в устройстве сложных элементов, при замене которых необходимо затратить большое количество времени.

Известно быстросъемное устройство (Патент SU 616375). Достоинством захватного устройства является не трудоемкость и удобство замены рабочего органа, которое достигается установленным в раме пружинно-гидравлическим замком с запирающей пластиной, которая зацеплена с ковшом посредством его опорной перекладины. Недостатком этого устройства является наличие пружинно-гидравлического замка, который может быстро выйти из строя.

Также известно быстросъемное устройство (Патент FR2657596). Достоинством является содержание в устройстве ручного механизма запирания, что позволяет быстро сменить рабочий орган, путем подъема (опускания) рычага. Недостатком является сложность в изготовлении элементов запирания ручного механизма.

Известно быстросъемное устройство (Патент AT392307). Достоинством устройства является наличие пружинного замка, который позволяет путем перевода пластины в открытое (закрытое) положение быстро сменить рабочий орган машин. Недостатком является сложность изготовления элементов запирания и монтирование их на технику.

Однако общим недостатком данных быстросъемных устройств является сложность изготовления комплектующих элементов их конструкций, а также непосредственного монтажа/демонтажа на базовую машину.

В процессе патентного поиска и последующего анализа быстросъёмных устройств была найдена конструкция (рис 1) оборудования гидравлического экскаватора (Патент RU 2365712), позволяющая исключить данные недостатки.

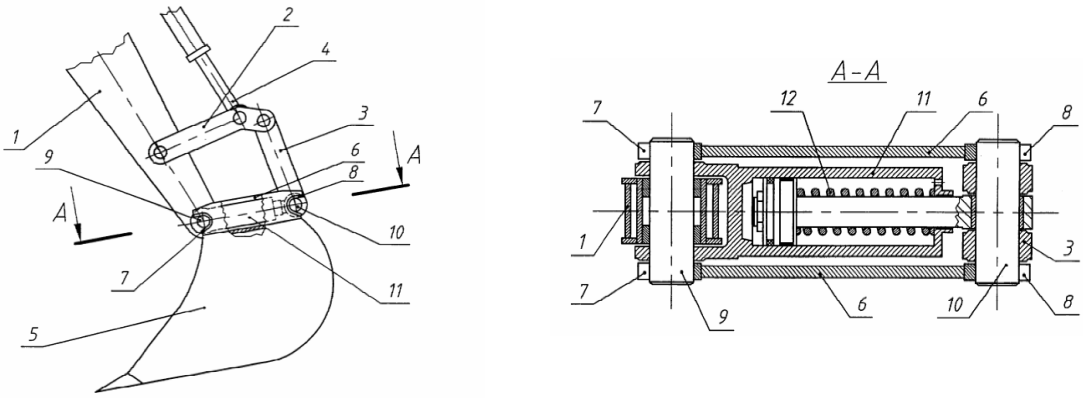


Рис 1. Быстросъемное устройство на экскаватор

Оборудование состоит из рукояти 1 гидравлического экскаватора (рис. 1), поворотного рычага 2, тяги 3, гидроцилиндра 4, ковша 5, на задней стенке которого имеются проушины 6 с зевообразными неподвижными захватами 7,8. При этом на рукояти 1 и свободном конце тяги 3 закреплены монтажные пальцы 9 и 10, которые соединены между собой при помощи гидроцилиндра управления 11 с пружиной 12, установленной в его штоковой полости.

Работа быстросъемного оборудования осуществляется следующим образом: соединения ковша 5 с рукоятью 1 производится в следующей последовательности. Сначала монтажные пальцы 9 и 10 при помощи гидроцилиндра управления 11 раздвигаются между собой и заводятся снаружи проушин 6 в зевообразные неподвижные захваты 7 и 8. После чего гидроцилиндр управления 11 переводится в сжатое положение и при помощи пружины 12 фиксирует захваты 7 и 8 в монтажных пальцах 9 и 10.

Демонтаж ковша 5 с рукояти 1 производится при переводе гидроцилиндра 11 в растянутое положение.

В целом устройство обеспечивает прочную фиксацию рабочего органа, который будет устанавливаться на машину для земляных работ, в данном случае на экскаватор.

Это объясняется тем, что, во-первых, быстросъемное устройство содержит малое количество составляющих изготовляемых деталей, гидроцилиндр, устанавливаемый на рукоять гидравлического экскаватора. Во-вторых, изменения рабочих органов, которые будут устанавливаться на данную землеройную технику, минимальны. И, в-третьих, устройство позволяет реализовать повышение производительности, снижение затрат времени на смену рабочего органа, тем самым повышая производительность и универсальность землеройной машине.

Таким образом, предлагаемое быстросъемное устройство имеет преимущества в отличие от других устройств.

Литература:

1. Патент РФ на изобретение SU 23298 A1 (SU), МПК G04C 21/31, 2000.01 Быстросъемное устройство / Комсовский П.П. – № 52064; заявл. 30.07.1929; опубл. 30.09.1931.
2. Патент РФ на изобретение SU 386076 A1 (RU), МПК E02F 3/28, 2000.01. Быстросъемное устройство на экскаватор / Егнус М.Я., Сабанчиев З.М. – № 1674413/29-14; заявл. 11.06.1971; опубл. 14.06.1973, Бюл №26.
3. Патент РФ на изобретение SU 616375 A1 (SU), МПК E02F 3/96, 2000.01 Быстросъемное устройство на экскаватор / Сидоренко О.П., Смоляницкий Э.А., Перлов А.С., Раннев А.В., Беркман И.Л., Буланов А.А., Агароник М.Я., Федоров А.П., Грязнов В.Н., Донской В.М. – № 2451824; заявл. 14.02.1977; опубл. 25.07.1978.
4. Патент FR на изобретение FR 2657596 A1 (FR), МПК B66C 3/02, Быстросъемное устройство на экскаватор / Morin Marcel et Morin Jacques– № 9000911; заявл. 26.01.90; опубл. 02.08.91 Бюл. №91/31.
5. Патент AT на изобретение AT 392307 B1 (AT), МПК E02F 3/40, E02F 3/80 Быстросъемное устройство на экскаватор / Winkelbauer Franz– №2443/87; заявл. 25.09.1887; опубл. 15.08.1990.
6. Патент РФ на изобретение RU 2365712 C1 (RU), МПК E02F 3/28, 2006.01 Быстросъемное устройство на экскаватор / Курилов Е.В., Алексеев А.А., Фурманов Д.В.– № 20081086692/03; заявл. 05.03.2008; опубл. 27.08.2008, Бюл № 24.

Quick-detachable device (BSU) working bodies on the basis of an excavator

Hrichkov A.V.
Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation
eclips51@mail.ru

Keywords: Bucket, cylinder, equipment, stock, spring

The article considers a new design of a quick-detachable device (BSU), using the example of excavating equipment. The design of this BSU allows for mobile change of working elements in any natural and climatic conditions, and also realizes the possibility of its operation without additional auxiliary operations when mounting / dismounting the replaceable operating parts of the machine. The proposed design of the BSU is simple in manufacture and versatility, which makes it possible to realize the possibility of its installation on other types of earthmoving machinery. The BSU has an effective hydraulic drive of the locking mechanism, which makes it possible to securely fix the operating element mounted on this excavator, while there will be no big changes either in the hydraulic drive of the machine when mounting the device or in the mounting parameters of the working element.

УДК534.01;622.24.053

Исследование шероховатости поверхности в зависимости от давления рабочего органа

Файзов А.Х.[1,a], Приходько А.С.[2,b], Герасимов С.Н[3,c]., Мамаев Л.А.[4,d]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]azamat.fayzov@mail.ru,[b]89086450954@mail.ru,[c]sdm_gerasimov@rombler.ru,[d]pro_uche@brtsu.ru

Ключевые слова: шероховатость, бетонная смесь, вибрация, давление рабочего органа

Отметим, что влияние давления на величину шероховатости носит нелинейный характер, отражающий ряд особенностей контактного взаимодействия: с увеличением давления величина шероховатости уменьшается, однако большое увеличение давления не приводит к адекватному снижению уровня шероховатости. Наблюдение за общим фоном вибрационных взаимодействий показывает, что рабочий блок с двумя рабочими головками совершает пространственные, а не одномерные колебания, в которых присутствует угловые компоненты продольного направления на уровне 1,3-1,5 мм на угловой частоте вращения кривошипов. Включение вибраторов [1] приводит к определенной стабилизации вибрационного состояния, амплитуда угловых колебаний уменьшается на 35-40%, при этом общая величина шероховатости, по сравнению со статическим нагружением, уменьшается в среднем на 18-20%. Таким образом, увеличение давления как сильнодействующий фактор имеет свои ограничения, которые, с одной стороны определяются условиями неразрывности контакта (квадрат частоты колебаний, умноженный на амплитуду, должен соответствовать величине земного ускорения), а с другой стороны зависит от нелинейных упругих свойств контактного взаимодействия.

Введение. Анализ графиков, представленных на рисунках 1 – 3 показывает, что в наибольшей степени рост давления рабочего органа на бетонную поверхность способствует снижению шероховатости поверхности при фиксации факторов X_2, X_3, X_4 на нулевом уровне значений и в этом случае шероховатость достигает своего минимального значения 0,6 мм.

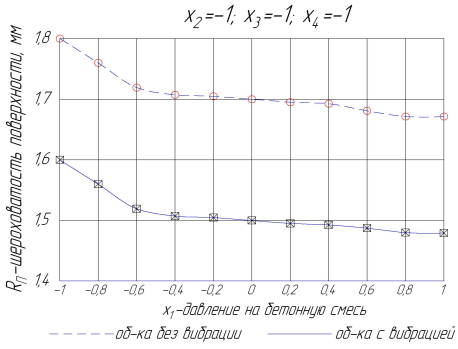


Рис. 1. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности при варьировании давления рабочего органа на бетонную смесь и значениях остальных параметров на нижнем уровне

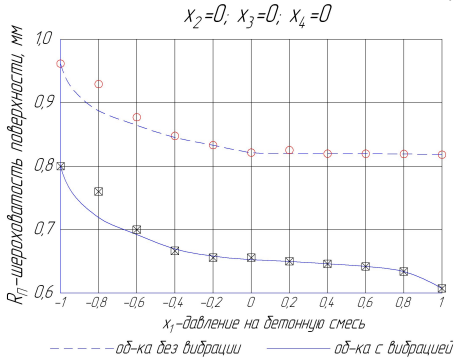


Рис. 2. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности при варьировании давления рабочего органа на бетонную смесь и значениях остальных параметров на нулевом уровне

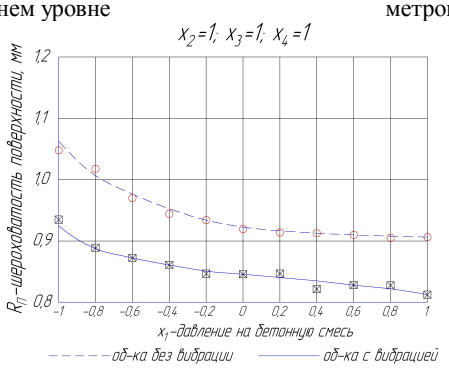


Рис.3. Влияние рабочего органа на шероховатость заглаживаемой поверхности при варьировании давления рабочего органа на бетонную смесь и значениях остальных параметров на верхнем уровне

Интенсивность снижение шероховатости при возрастании давления от -1 до +1 в этом случае наиболее высока и составит величину порядка 0,2 мм. Вместе с тем, необходимо отметить, что вибрация рабочего органа оказывает положительный результат как регулирующий фактор, чье положительное действие нуждается в подстройке параметров движения рабочих головок.

При проведении эксперимента [2] были получены данные, характеризующие влияние давления на бетонную поверхность при действии вибрации (50 Гц) и при статическом приложении усилий через механизм подъема - опускания каретки (в пределах 150 Н). На рисунке 1 – 3 показаны графики зависимости уровня шероховатости от величины давления, обозначенного через X_1.

Выводы: По результатам обработки данных [3] можно сделать заключение об особенностях фактора изменения давления (зависимость $R_П$ от X_1).

1. При фиксации интенсивности, жесткости и заглаживающей способности на нижнем уровне значений (рис. 1) шероховатость поверхности при возрастании давления рабочего органа на обрабатываемую поверхность в диапазоне кодированных значений от -1 до -0,6 значительно снижается, при дальнейшем возрастании давления до значения -0,4 шероховатость поверхности вначале несколько возрастает, затем снижается до значения 1,5 мм и при дальнейшем росте давления на бетонную поверхность практически не изменяет своего значения.

2. При фиксации факторов интенсивности, жесткости и заглаживающей способности на нулевом уровне значений (рис. 2) качество обработки поверхности имеет устойчивую тенденцию к росту, причем при возрастании давления от кодированного значения -1 до значения – 0,6 шероховатость поверхности снижается весьма интенсивно, при возрастании давления от кодированного значения -0,6 до значения +0,4 шероховатость обработки снижается незначительно и только при дальнейшем росте давления от +0,4 до +1 шероховатость поверхности вновь значительно снижается и достигает минимального значения 0,6 мм.

3. При фиксации факторов интенсивности, жесткости и заглаживающей способности на максимальном уровне значений (рис. 3) величина шероховатости поверхности также имеет тенденцию к снижению. Однако прирост качества обработки (снижение шероховатости) бетонной поверхности в этом случае незначителен и при возрастании давления рабочего органа в диапазоне от -1 до +1 величина шероховатости снизилась всего на 0,1 мм.

Литература:

1. Герасимов С.Н., Соколов А.П., Федоров В.С., Дубынина И.А., Багаудинов И.Б. Рабочий орган заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками // Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. – 440 с.

2. Соколов А.П., Федоров В.С., Багаудинов И.Б., Василюк О.Э. Определение заглаживающей способности рабочего органа заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками // Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. – 440 с.

3. Соколов А.П., Федоров В.С., Багаудинов И.Б., Василюк О.Э. Описание лабораторного стенда и метода экспериментальных исследований рабочего органа заглаживающей машины в виде бруса с вибрационными дисками// Механики XXI веку.XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов.- Братск ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2012. – 440 с.

Study of surface roughness in relation to the pressure of the body

Fayzov A.H.[1a], Prikhodkov A.S.[2,b], Gerasimov S.N.[3,c], Mamaev L.A.[4,d].

Bratsk State University, st . Makarenko 40, Bratsk, Russia
[a]azamat.fayzov@mail.ru,[b]89086450954@mail.ru,[c]sdm_gerasimov@rombler.ru,[d]pro_uche@brtsu.ru

Keywords: surface roughness, surface, carriage-dimensional co-oscillations, static loading, the pressure of the working body

Note that the effect of pressure on the value of the roughness is not linear, reflecting a number of features of contact interaction: a roughness value of the increase in pressure is reduced, however, a large increase in pressure does not lead to adequate reduction in roughness level. Observation of the general background vibration interactions indicates that operating unit with two working heads performs spatial rather than one-dimensional oscillations, in which the angular components present at the level of the longitudinal direction of 1.3-1.5 mm at an angular frequency of rotation of the cranks. Turning vibrators [1] leads to stabilization of certain vibrational states of angular oscillation amplitude is reduced by 35-40%, while the total amount of roughness as compared with the static loading is reduced on average by 18-20%. Thus, the increase in pressure as a potent factor has its limitations, which, on the one hand determined by the continuity of contact conditions (square wave frequency multiplied by the amplitude value must correspond to acceleration due to gravity), while on the other hand depends on the nonlinear elastic properties of the contact interaction.

УДК 621. 879. 3: 534. 8

Redusing the adhesion between soil and working bodies of earth-moving machines using piezoceramic emitters

ZenkovS.A.[a], Mineev D.A.[b], Gleba V.S.[c], Kirichenko O.P.

Bratsk State University,40Makarenkost., Bratsk, 665709, Russian Federation
[a]mf@brstu.ru, [b]mineev_67@mail.ru, [c]vladxpohoc@gmail.com

Keywords: piezoceramic, emitter, adhesives, earth-moving machines, soil

This article examines the use of piezoceramic emitters for controlling adhesion of soil to the working bodies of earth-moving machines. Also, an experiment, was performed, and the experimental data obtained. After treatment patterns and shows a graphical interpretation of the effect of piezoceramic emitters were obtained. Subsequently, it was concluded that the use of piezoceramic emitters it more advantageous in terms of compactness and equally spaced on the surface of the working body than, for example, the use of the currently existing means for heating the ladle or vibration exposure has been shown that the technical performance of the excavator with a device intensifying action to reduce adhesion of soils when working on wet ground at a negative temperature in 1,2…1,4 times greater than the excavator is not equipped with such a device, i.e. the economic impact of their implementation due to increased productivity. Therefore, we can talk about the feasibility of the use of piezoceramic emitters to reduce soil adhesion to the working bodies ground machines.

In developing the machine wet cohesive soils (especially with negative temperature) adhesion and freezing of the soil at the working bodies essentially performance machines. Performance

degradation is due to the reduction in the useful capacity of the bucket and by partial discharge due to growth in both the grag when cutting (digging) a result of sticking of wet soil to the working body and the resistance of the input in the bucket, as well as increasing machine downtime due to the need cleaning of working bodies are four groups of methods to eliminate adhesionsoil to the surface of the working bodies of earth-moving machinery: methods of creating on the border of the contract interlayer methods, combined methods in principle action methods and tools to deal with the nature and the adhesion and frost soil to working bodies of earth-moving machines can be divided into prevention (prevention of adhesion and cleaning bucket recovery evacuates soil capacity) was found to be most effective combined methods such as combining the dignity of two or move methods and vibroheated[1-7] the use of high-impact considered in the article relating to the high-frequency combined methods(a combination of vibration and heating).

High frequency inverter impact piezoceramic emitters (Fig.1), which consists of 2 ceramic plates1, top of duralumin D16T, 4 of the bottom lining hundred spacers 3, 0,2-0,3 mm thick mild foil. Central goes into the holes in the piezoceramic plates and cover plates. The piezoceramic elements are used to ring mass of PZT-19 with dimensions: an outer diameter of 50 mm, internal 20 mm [8-13].

The experiments were made on a laboratory stand at different environment temperature (-10^0C, -15^0C, -20^0C). To carry out the tests they take dispersed, connected, the loamy soil of different soil moisture content X_1(W=7,5%; 12,5%; 17,5%).

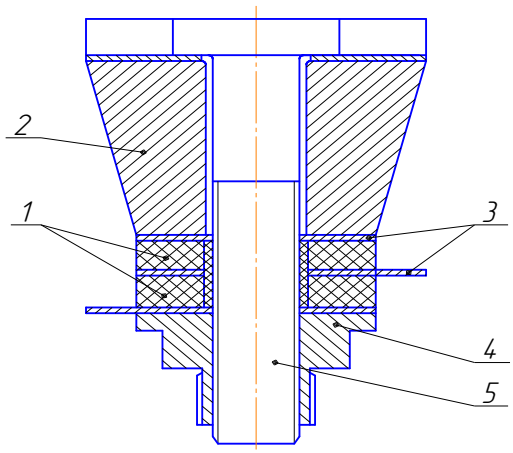


Fig.1. Packet structure of converter central bolt 37 kHz.

Essence of the experiment is as follows compactor sample specific weight moisture was placed on the simulator excavator bucket set in piezoceramic emitters and it was frozen at a certain temperature for a period of time, after this time the transmitter switched on and the axis of the after which the sample is fiеd on the compactor simulator [14-16].

The results of processing experimental test series have shown that the required number of repeated experiments with isolation from the metal surfaces of all types involved in a pilot study of soil is at least three regression equations of fig. 2, 3 shows a graphical interpretation of the following mathematical treatment of the experimental results using AdvancedGrapher program.

In this graph it can be concluded that the soil sample for separation by freezing termination period of 15 minutes, the surface excavator simulator with 7,5% weight moisture, regardless of the ambient temperature requires the longest time exposure converter since in the ground water and a small amount of sample is not only freezes to the metal adhesion occurs and therefore the need for greater amounts of energy drying the soil in contact with the metal. For soil moisture with a weight of 17,5% is to be a little less exposure time converter since in wetter soil strength soil freezing to the metal is caused by the strength of the ice, and is known under the thermoacoustic effect on the frozen ground in the first place is the destruction of ice contained in the soil. The graph also shows that soil moisture with weight 12,5% must be the least enough for lasting freezing do the metal, but do not already occurring soil adhesion process, because water freezes faster.

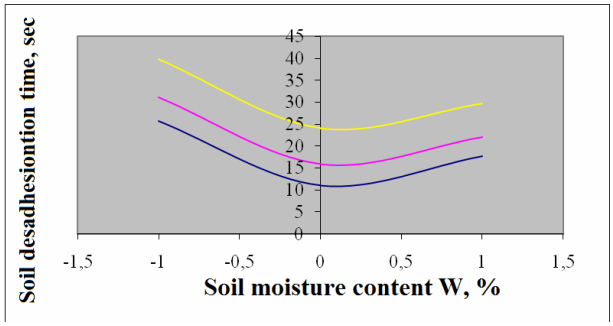


Fig.2. Schedule time depending on the weight of separation of soil moisture at the soil environmental -20^0 (1); -15^0 (2); -10^0 (3)

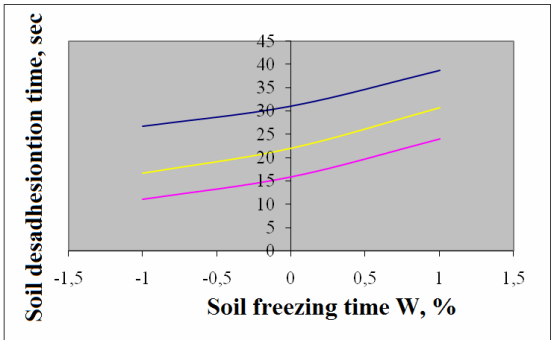


Fig.3. Schedule time depending on the time of separation of soil freezing at the ground t of environment -20^0 (1); -15^0 (2); -10^0 (3)

By this graph it can be concluded that with decreasing ambient temperature of -10of -20 (sample weight compactor humidity equal to 17,5% and corresponds to the natural moisture content for the type of soil), the increase of time freezing, increases the duration of exposure to the converter for the separation of the sample from the simulator. This fact is caused by the fact that at temperatures below freezing during the freezing water in the soil sample is directly proportional to a decrease in ambient temperature.

Technical machine performance with the device intensifying action to reduce adhesion of soils when working in wet soils at subzero temperatures in 1,2…1,4 times higher [6], than the excavators are not equipped with such device, i.e. the economic impact of their implementation due to increased productivity. Therefore, we can talk about the feasibility of the use of piezoceramic emitters to reduce adhesion soil to working bodies of earth-moving machines.

References:

1. Wang X L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds), pp 539-545. China Machine Press, Beijing, China.

2. Azadegan B., Massah J. Effect of temperature on adgesion of clay soil to steel. // CercetăriAgronomiceîn Moldova Vol. XLV, No. 2 (150) / 2012. P. 21-27.

3. Zadneprovsky R.P. Teoriya treniya skol'zheniya [The theory of sliding friction]. Volgograd: Ofset, 2005. 51p.

4. Rajaram G., Erbach D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. // Journal of Terramechanics 36 (1999) P. 39-49.

5. Zadneprovsky R.P. Working bodies of earthwork and reclamation machines and equipment for the development of soils and materials of high humidity. - M.: Mechanical Engineering, 1992. 176 c.

6. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Анализ возможного повышения производительности экскаваторов при термоакустическом воздействии для устранения адгезии грунта к ковшу // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественныеиинженерныенауки. 2008. Т. 2. С. 137-140.

7. Chen B., Liu D., Ning S., Cong Q. Research on the reducing adhesion and scouring of soil of lugs by using unsmoothed surface electro-osmosis method. // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, №11(3), 1995. P. 29-33.

8. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Lkhanag D., Battseren I. Definitions of time from the surface soil breakout body work in a high impact. // Scientific transactions № 3/139, Ulaanbaatar, Mongolia, MUST, 2013. – P. 144-146.

9. Ignatyev K.A., Filonov A.S., Zarubin D.A. Application of piezoceramic radiators for combating adhesion or soils to excavating part of an earthmoving machine Science and Education: materials of the II international research and practice conference, Vol. I, Munich, December 18th-19th , 2012 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich- Germany, 2012. P. 251-256.

10. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение производительности экскаваторов при снижении адгезии грунтов. // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук высшей школы России. 2010. № 2 (17).с. 191 – 195.

11. Зеньков С.А., Козик А.С., Буйлов О.А., Зеньков А.С. Устранение адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин при помощи ультразвукового воздействия // Механики XXI веку. 2011. № 10. С. 146-148.

12. Зеньков С.А., Курмашев Е.В. Определение параметров вибрационного оборудования к ковшам экскаваторов для снижения адгезии грунтов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 89-2. С. 90-94.

13. Зеньков С.А., Батуро А.А. Комбинированное устройство снижения адгезии грунта к ковшу экскаватора // Механики XXI веку. 2007. № 6. С. 76-78.

14. Зеньков С.А., Товмасян Э.С. Математическая модель для определения параметров оборудования высокочастотного действия при проектировании ковшей экскаваторов // Современные проблемы теории машин. 2014. № 2. С. 41-44.

15. Зеньков С.А., Батуро А.А., Булаев К.В., Диппель Р.А. Анализ структуры рабочего органа ковшового типа с устройством внешнего интенсифицирующего воздействия для снижения адгезии грунта // Механики XXI веку. 2005. № 4. С. 49-52.

16. Зеньков С.А. Методика расчета оборудования с акустическим воздействием для снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 2-1 (26). С. 67-72.

Устранение налипания грунта на рабочие органы землеройных машин с использованием пьезокерамических излучателей

Зеньков С.А.[a], Минеев Д.А.[b], Глеба В.С.[c], Кириченко О.П.

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]mf@brstu.ru, [b]mineev_67@mail.ru, [c]vladxpohoc@gmail.com

Ключевые слова: пьезокерамика, излучатель, адгезия, землеройная машина, грунт

В данной статье рассматривается применение пьезокерамических излучателей для борьбы с адгезией грунтов к рабочим органам землеройных машин. Также был выполнен эксперимент, и получены экспериментальные данные. После обработки были получены закономерности и показана графическая интерпретация влияния пьезокерамических излучателей. В дальнейшем были сделаны выводы, что применение пьезокерамических преобразователей более выгодно с точки зрения компактности и равномерности расположения по поверхности рабочего органа чем, к примеру, использование существующих на данный момент средств для обогрева ковша или вибрационного воздействия. Показано, что техническая производительность экскаватора с устройством интенсифицирующего действия для снижения адгезии грунтов при работе на влажных грунтах при отрицательной температуре в 1,2…1,4 раза больше, чем у экскаваторов, не оборудованных подобным устройством, т.е. экономический эффект от их внедрения обусловлен повышением производительности. Поэтому можно говорить о целесообразности применения пьезокерамических преобразователей для снижения адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин.

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Янюшкин А.С. Воспоминания, посвящаются памяти М.Б. Гордона, становлению и развитию кафедры "Технология машиностроения" в ЧГУ им. И.Н. Ульянова **4**

Янюшкин А.С. Перспективы развития научной школы кафедры "Технология машиностроения" Братского государственного университета **10**

Шеров К.Т., Мусаев М.М. Особенности стружкообразования при термофрикционном фрезоточении **17**

Попов В.Ю. Выбор программы для эмуляции физики резания **21**

Михайлов А.Н., Лукичев А.В., Костенко А.В., Сакно О.П. Функционально-ориентированный подход к системе технологических воздействий при техническом обслуживании и ремонте транспортных средств **27**

Богуцкий Б.В., Дзюбаба Р.Н., Новоселов Ю.К. Влияние технологических факторов на параметры шероховатости поверхности при обработке абразивными инструментами **33**

Бондин А.В. Базовые методы компьютерной анимации в машиностроении **37**

Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х., Нозирзода Ш.С. Анализ конструкции сборного сверла со сменными многогранными пластинами **44**

Кузнецов С.Ф. Повышение эффективности фрезерования геометрически сложных деталей путем коррекции положения инструмента **51**

Колесников П.Г., Гордеев М.П., Пешков А.А. Применение систем инженерного анализа при проектировании лесопогрузчиков **58**

Баранов А.Н., Кутовенко М.В., Янюшкин С.А., Коренюгин К.В. Электромеханическая очистка растворопроводов на Братском алюминиевом заводе **61**

Гордеева Э.С., Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б. Оценка влияния режимов фрикционной обработки на характеристики наносимого покрытия **64**

Давыдова И.В., Золотопуп И.В., Гончаров М.О. Модель образования тороидально-винтового потока в рабочей камере при ЦРО **67**

Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х., Сироджидинов Ш.А. Выбор режима резания при ступенчато переменных параметрах процесса **70**

Аль-Джонид Х., Козлов А.М. Моделирование диагностики работоспособности станков с чпу **73**

Леонтьев И.А., Демешко П.В., Проскурин Р.С., Герасимов Н.В. Разработка конструкциииспециального приспособления для заточки расточного инструмента **78**

Ереско А.С., Ереско С.П., Ереско Т.Т., Кукушкин Е.В., Орлов А.А. Разработка модуля измерения деформаций с помощью тензорезисторов с использованием arduino **82**

Жабинская А.Н., Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А. Обзор вопросов по малоцикловой усталости игольчатых подшипников **85**

Редькин А.В., Орлов А.И., Ильин В.С. Способ управления устойчивостью мобильного грузоподъемного крана и устройство для его осуществления **89**

Карасов Т.А., Храмовских В.В., Жихарев В.С. Проблемы резания композитов с высокопрочными наполнителями **93**

Михайлов А.Н., Костенко А.В. Особенности схем технологических воздействий отделочно-упрочняющей обработки цилиндровых втулок судовых дизелей **98**

Подгорный Ю.И., Мартынова Т.Г., Скиба В.Ю., Тертова А.И., Дюбанова И.Д. Синтез кинематических схем механизмов для привода возвратно-поступательного движения экспериментальной установки смесителя **103**

Кучумова И.Д. Исследование структуры и свойств вихревых зон многослойного материала «молибден-медь» полученного сваркой взрывом **108**

Лебедев В.А., Серга Г.В., Демин Г.В., Ломовцев А.А. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей обработки деталей на основе роторно-винтовых технологических систем **111**

Пешехонов К.Ю., Тарапанов А.С. Вариант анализа пространства формирования зубьев спироидных колёс **116**

Хлыстов А.Н. Адаптивность алгоритмов моделирования кристаллических решёток **120**

Колесников П.Г., Пешков А.А., Гордеев М.П. Прототипирование при проектировании лесопогрузчиков **126**

Красильников Б.А., Кадырбаев Р.М., Проскурин Р.С., Демешко П.В. Электроалмазное глубинное шлифование специального инструмента из ВК8 **129**

Пятых А.С. Моделирование динамической устойчивости процесса сверления **133**

Тарапанов А.С., Шаблинская Т.Н. Комплексный анализ формообразования круговых зубьев цилиндрических колес **137**

Лосев Е.Д., Кузнецов А.М. Исследование микроструктуры поверхности сплава ТН-20 после комбинированного метода электроалмазной обработки **143**

Селина О.В., Кувырдина И.Н., Иванов А.В. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов с систематизацией информации о режущих инструментах **150**

Малютин Г.Е. Совершенствование чистового фрезерования вогнутых поверхностей на станках с чпу **155**

Якубович И.О., Муниров Д.В., Шеллер В.В. Влияние прихваток, выполненных ручной аргоновой сваркой, и отклонения электронного пучка при электронно-лучевой сварке относительно свариваемого стыка на качество продольного шва обечайки ракеты-носителя **161**

Скиба В.Ю., Хлебова И.В., Скиба П.Ю., Рубцова Н.С. Установление эксплуатационных нагрузок привода гибридных металлообрабатывающих станков **165**

Коноплев В.И., Анцев В.Ю., Воробьев А.В., Мельников Е.С. Гравитационное устройство для выгрузки кускового материала из бункера **170**

Решетникова Е.П., Бочкарёв П.Ю. Классификация деталей со сложнопрофильными поверхностями в технологической подготовке механообрабатывающих производств **173**

Тараховский А.Ю. Разработка устройства для сборки уплотнительных соединений типа «эластичный кольцевой элемент – канавка отверстия» **178**

Назарьев А.В., Бочкарёв П.Ю. Организация структуры комлекса проектных процедур для автоматизации технологической подготовки механообрабатывающего производства высокоточных изделий с учетом требований сборки **182**

Тараховский А.А., Тараховский А.Ю. Типизация базовых деталей уплотнительных соединений (эластичная кольцевая деталь – канавка отверстия) **189**

Шалыгин М.Г. Комплексная технология повышение износостойкости деталей пар трения, работающих в водородных средах **194**

Ярцев Е.Н., Назаров В.П. Автоматизация технологических процессов изготовления и монтажа трубопроводов двигателей летательных аппаратов **198**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Огар П.М., Горохов Д.Б., Кожевников А.С., Угрюмова Е.В. Внедрение сферического индентора в упругопластическое упрочняемое полупространство **203**

Бохоева Л.А., Баиров С.А., Арапова И.А., Кондратьева А.Н. Расчет и оценка прочности композиционного фланца **208**

Кожевников А.С. Упрощенная модель слоистого упругого тела **212**

Гнидан К.А., Тютюнькова М.К., Безрукова В.А. Влияние добавки ниобия на структуру самофлюсующихся плазменных покрытий **218**

Горохов Д.Б., Кожевников А.С., Угрюмова Е.В. Математическая модель шероховатой поверхности для решения задач герметологии **223**

Зеньков Е.В. Исследование вида напряженно-деформированного состояния экспериментальной модели штуцерного узла сосуда давления методом конечных элементов **234**

Курохтин В.Ю., Бохоева Л.А., Кибирева Е.Е. Определение скорости роста усталостных трещин в лопастях винта вертолета **240**

Шоркин В.С., Якушина С.И. Условия адгезии и антиадгезии **244**

Зверев Е.А., Скиба В.Ю., Вахрушев Н.В., Гаврилов А.К. Влияние режимов плазменного напыления на остаточные напряжения в износостойких покрытиях **247**

Маркова Е.В., Чечуга О.В. Моделирование микротвердости по структуре диффузионных зон покрытий **250**

Нечаев Л.М., Фомичева Н.Б., Сержантова Г.В. Структурная гетерогенность как условие формирования малых трещин в покрытии **254**

Горунович С.Б. Раскрытие статической неопределимости в симметричных стержневых конструкциях с учетом податливости связей **257**

Матц О.Э., Фелофьянова А.В., Воробьев Р.С. Композиционный материал "алюминий-магний", сформированный сваркой взрывом **261**

Красновейкин В.А., Скрипняк В.А., Москвичев Е.Н., Козулин А.А., Бородулин Д.А. Изменение физико-механических свойств алюминиевого сплава 1560 после обработки интенсивной пластической деформацией **263**

Мацеля В.И., Сеелев И.Н., Леконцев А.В., Хафизов Р.Р., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В., Яковлев П.В. Конечно-элементная расчётная модель промышленных зданий как система тонкостенных стержней открытого профиля **269**

Рогов В.Е., Бочектуева Е.Б., Пнёва М.А. Трансформация тефлонсодержащих частиц при использовании в двигателе автомобиля **277**

Коронатов В.А., Герасимов С.Н. Вибровращательное погружение рабочего органа в пластическую среду **280**

КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Рыков С.П., Коваль В.С., Рыкова О.А. Программный комплекс для численного анализа колебаний подвески автомобиля Часть 1. Построение модели возмущающего воздействия неровностей дороги **286**

Рыков С.П., Коваль В.С., Рыкова О.А. Программный комплекс для численного анализа колебаний подвески автомобиля Часть 2. Моделирование эффекта переменного сглаживания шиной неровностей дороги **295**

Пустоветов М.Ю. Оценка влияния несинусоидальности напряжения питания на пульсации электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя в составе вспомогательного электропривода электровоза переменного тока **302**

Витковский С.Л. Оценка качества процессов впуска и сжатия бензинового и дизельного двигателей автомобиля **306**

Стручков А.В., Климов А.А., Ереско Т.Т. Исследования влияния плотности разрабатываемого грунта на эксплуатационную нагруженность трансмиссий трактора **309**

Ясенков Е.П., Парфенова Л.А. Результаты внедрения новых примерных программ профессиональной подготовки водителей транспортных средств в Российской Федерации **314**

Гоибов Н.Р. Теоретические исследования автомобильного колеса **320**

Коваль В.С., Захаров Д.С. Экспериментальные исследования упругих и демпфирующих свойств колесных движетелей с безвоздушными шинами **324**

Гринштейн Н.М. Исследование плавности хода автомобиля с пневматическими шинами повышенной безопасности **329**

Мухиддинзода К.Д., Гоивоб Н.Р. Анализ конструкций колёс с безвоздушными шинами **333**

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Зеньков С.А., Минеев Д.А. Использование ремонтно-восстановительных составов для снижения адгезии грунтов к рабочим органам машин **337**

Гранкин А.Д. Фрезерный рабочий орган с поворотными режущими инструментами **341**

Зеньков С.А., Балахонов Н.А., Дрюпин П.Ю. Обзор нагревательных элементов в качестве средства для борьбы с адгезией грунта в условиях отрицательных температур **345**

Мороз Д.Р. Техника для открыто-подземной разработки твердых полезных ископаемых **350**

Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., Губанов В.Г., Лханаг Д., Плеханов Г.Н., Жмуров В.В., Кобзова И.О., Кулаков А.Ю., Трофимов А.А. Уточнённая классификация гидроцилиндров **354**

Чебан А.Ю., Соболев А.А., Корнеева С.И. Перегрузочный пункт для комбинированного транспорта **361**

Зеньков С.А., Абдукундузов А.В. Тенденции развития методов снижения адгезии грунтов к ковшам экскаваторов по конкурирующим группам **365**

Казимиренок А.А., Федоров В.С. Совершенствование гидропривода для условий крайнего севера **370**

Сапегин Ю.К. Способы подготовки прочных горных пород к выемке в горном деле и строительстве **373**

Ефремов М.И. К вопросу назначения амплитудно-частотной характеристики вибросмесителя **377**

Файзов А.Х., Приходько А.С., Герасимов С.Н., Мамаев Л.А. Исследование шероховатости поверхности в зависимости от жесткости бетонной смеси **381**

Хричков А.В. Быстросъёмное устройство (БСУ) рабочих органов на базе экскаватора **383**

Файзов А.Х., Приходько А.С., Герасимов С.Н., Мамаев Л.А. Исследование шероховатости поверхности в зависимости от давления рабочего органа **386**

Zenkov S.A., Mineev D.A., Gleba V.S., Kirichenko O.P. Redusing the adhesion between soil and working bodies of earthmoving machines using piezoceramic emitters (Устранение налипания грунта на рабочие органы землеройных машин с использованием пьезокерамических излучателей) **388**

Опубликовано в авторской редакции
Дизайн обложки Попов В.Ю.
Подписано в печать 11.05.2017
Формат 84 x 108 $^{1}/_{11}$
Уч.-изд. л. 36,0. Усл. печ. л. 36,0.
Тираж 60 экз. Заказ
Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «БрГУ»

Братский государственный университет
665709, г. Братск Иркутской области, ул. Макаренко 40