

В.Ю. Попов, К.И. Большаков, М.Ю. Беловенцева, Г.И. Данченко

*Братский государственный университет*

## АНАЛИЗ ИЗНАШИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКЕ

Износ рабочей поверхности круга при шлифовании является сложным физико-химическим и механическим процессом, протекание которого зависит от всех условий обработки: характеристики круга, свойств обрабатываемого материала, режима резания и др.

В зависимости от свойств шлифовальных кругов и условий обработки круги могут работать с самозатачиванием и с затуплением.

Затупление круга наступает в результате обламывания невыгодно расположенных шлифующих зерен, последовательного их расщепления и образования площадок износа, когда зерна теряют свои режущие свойства [1].

В зависимости от условий шлифования различают следующие основные виды износа (рис. 1):

1. Истирание режущих элементов шлифующих зерен с образованием на них площадок с большей или меньшей шероховатостью (рис. 1, а).
2. Микроразрушение зерен с отделением от них небольших частиц (рис. 2, б).
3. Разрушение зерен с отделением от них небольших частиц, соизмеримых с размером зерна (рис. 1, в).
4. Полное вырывание зерен из связки (рис. 1, г).
5. Разрушение в результате протекания химических реакций в зоне контакта зерна с обрабатываемым материалом при высоких температурах, развивающихся в зоне шлифования (рис. 1, д).
6. Забивание промежутков между зернами стружкой и продуктами износа (рис. 1, е).

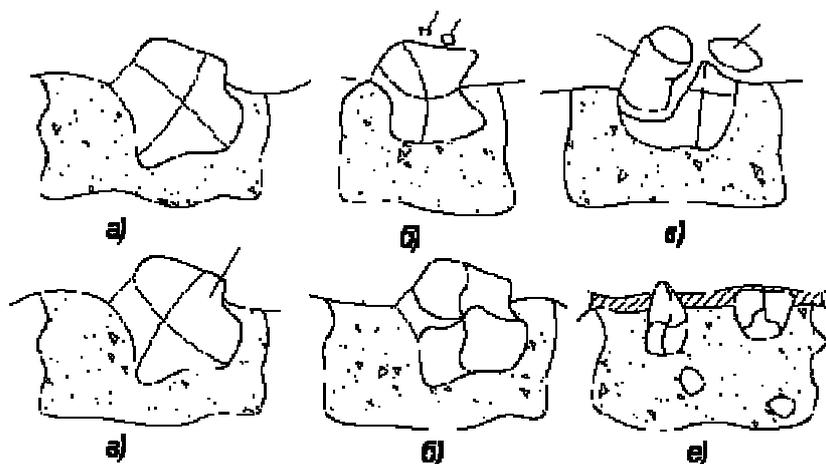


Рис. 1. Основные виды износа шлифовального круга

Алмазные круги на металлических связках имеют свои особенности работы и износа, обусловленные тем, что они изготавливаются из более прочных алмазов марок АС4 и весьма прочных алмазов марки АС6, которые закрепляются в износостойкой и прочной связке. Вначале изнашиваются наиболее выступающие над поверхностью режущие кромки, затем образование площадок износа наблюдается одновременно на нескольких режущих кромках одного и того же зерна. На притупившиеся алмазные зёрна действуют повышенные нагрузки, в результате чего зёрна могут частично скалываться, либо разрушаться. Разрушенное алмазное зерно имеет меньшее превышение над уровнем связки, но образует значительное число режущих кромок, которые могут участвовать в работе и положительно

влиять на процесс шлифования. В ряде случаев, отколовшиеся осколки зёрен оставляют довольно глубокие следы при перекатывании по поверхности, находясь между обрабатываемой деталью и кругом. Под действием нормальных усилий отколовшиеся зёрна могут вновь внедряться в связку и продолжать участвовать в съёме обрабатываемого материала. Выпадения зёрен повышенной прочности марки АС4 у кругов на бронзовой связке практически не происходит. Весьма прочные зёрна марки АС6 иногда вырываются из связки. Утверждается [2], что при шлифовании они изнашиваются медленно, при чём из-за их высокой прочности выкрашивание режущих кромок, как и у зёрен марок АС2 и АС4, происходит весьма редко.

Можно привести сравнительный анализ полученных ранее данных по применению электроалмазной обработки инструментальных материалов, с полученными нами данных в результате проведённых исследований. Таким образом, исходя из условий обоснованного минимального удельного расхода алмазов, рациональными для затачивания инструментальных материалов следует считать режимы резания, представленные в таблице.

Таблица

Рекомендуемые режимы резания и результаты их применения при комбинированной электроалмазной обработке инструментальных материалов

Материал	У7, 9ХС		Р6М5		Т15К6	
	[3, 4, 5, 6]	[7]	[3, 4, 5, 6]	[7]	[3, 4, 5, 6]	[8]
V, м/с	15...40	35	18...30	35	20...30	35
S, м/мин	1,5	1,5...2	0,05...1,5	1...1,5	1,5...2	2,0...2,5
$i_{пр}, А/см^2$	-	0,17...0,3	-	0,2...0,3	-	0,2...0,3
$i_{пр}, А/см^2$	-	6...8	-	6,25	-	15...20
t, мм/дв.ход.	0,04...0,8	0,02...0,03	0,04...0,8	0,015...0,02	0,07...0,2	0,03...0,04
Ra, мкм	0,025...0,63	0,07...0,14	0,08...0,63	0,048...0,14	1,25...0,63	0,1...2,15
q, мг/г	1,3..3,2	0,09...0,2	0,2...0,3	0,1...0,2	0,4...0,6	0,13...0,25

#### Библиографический список

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. 1974. – 320с.
2. Семко М.Ф. Основы алмазного шлифования. – Киев: Техніка, 1978. – 192 с.
3. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник. 1982. – 400 с.
4. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки. 1985. – 264с.
5. Артамонов Б.А. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. 1983. – 208 с.
6. Орлов П.Н. Краткий справочник металлиста. 1987. – 1960 с.
7. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228с.
8. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем устарения их засаливания. Автореферат канд. техн. наук, Томск, 2010. – 20 с.

К.И. Большаков, В.Ю. Попов

Братский государственный университет

### АНАЛИЗ ЗАСАЛИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКЕ

Современный уровень развития машиностроения требует постановки на одно из главных мест проблему повышения эффективности производства, решение которой неразрывно связано с вопросами повышения эффективности технологических методов обработки. Это вызывает необходимость поиска новых прогрессивных технологических методов обработки и дальнейшего совершенствования существующих методов и технологий, позволяющих значительно улучшать качество изделий и обеспечивать высокие эксплуатационные показатели, повышая при этом производительность механической обработки.

К наиболее прогрессивным, высокопроизводительным методам абразивно-алмазной обработки относится шлифование. Шлифование – это процесс резания материалов с помощью абразивного материала, режущими элементами которого являются абразивные зерна. Шлифование применяется как для черновой, так и для чистовой и отделочной обработки [1].

Электроалмазное шлифование (ЭАШ) – это комбинированный метод обработки, при котором имеют место электрохимическое, электрофизическое и механическое воздействия на обрабатываемую поверхность заготовки. В зависимости от условий обработки могут превалировать те или другие явления. Преимуществом применения ЭАШ является значительное снижение сил резания и температуры в зоне контакта инструмент-деталь, что в свою очередь приводит к снижению деформационных напряжений в поверхностном слое детали.

Современный инструментальный материал должен иметь высокую твердость, чтобы в течение длительного времени срезать стружку. Значительное превышение твердости инструментального материала по сравнению с твердостью обрабатываемой заготовки должно сохраняться и при нагреве инструмента в процессе резания. Режущая часть инструмента должна обладать большой износостойкостью в условиях высоких давлений и температур.

В настоящее время для изготовления режущих элементов инструментов применяются как инструментальные стали, так и твердые сплавы.

Режущие инструменты, изготовленные из углеродистых инструментальных сталей У10А, У11А, У12А, У13А, обладают достаточной твердостью, прочностью и износостойкостью при комнатной температуре, однако теплостойкость их невелика. Для изготовления режущих инструментов также используются стали 11ХФ, 13Х, ХВ4, В2Ф неглубокой прокаливаемости и стали Х, 9ХС, ХВГ, ХВСГ глубокой прокаливаемости.

Из металлокерамических твердых сплавов изготавливают пластинки твердого сплава различных размеров и форм, которыми оснащаются резцы, фрезы, сверла, зенкеры, развертки и др.

Абразивные инструменты при шлифовании инструментальных сталей и твердых сплавов подвергаются периодическим и перманентным силовым, тепловым и физико-химическим воздействиям, в результате которых их рабочие поверхности изнашиваются, затупляются и засаливаются.

Под засаливанием понимают непрерывный процесс адгезионно-диффузионного засорения абразивного слоя шлифовального инструмента элементами обрабатываемого материала, влекущий за собой потерю его производительности и режущей способности. Засаливание является основной причиной потери режущей способности абразивных инструментов. В результате засаливания теряют режущую способность еще не затупленные зерна. Для восстановления его режущей способности и исправления геометрической формы применяют правку шарошками, твердосплавными роликами, абразивными дисками и техническими алмазами. Интенсивность засаливания увеличивается при увеличении твердости шлифовального круга и с уменьшением их зернистости.

Засаливание круга приводит к снижению его стойкости, вызывает вибрации и дробление, сопровождается резким повышением температуры в зоне резания. Правильный выбор состава и метода подвода СОЖ позволяет уменьшить износ и засаливание круга, повышает его работоспособность, улучшает качество поверхностного слоя и повышает точность обработки. Однако при чрезмерно высоком смазывающем действии охлаждающей жидкости может слишком ускориться явление засаливания круга, что вызывает отрицательное влияние на его работу.

На засаливание круга при шлифовании и затачивании влияет структура круга. Структура характеризует строение абразивного инструмента в зависимости от количественного соотношения между зернами, связкой и пораами в единице объема.

Во избежание засаливания круга для мягких металлов следует применять более мягкие круги. Чем тверже обрабатываемый материал, тем мягче должен быть круг. Исключением являются весьма мягкие и вязкие металлы и сплавы (алюминий, медь, бронза, латунь и др.), их лучше обрабатывать мягкими кругами [2].

Таким образом, при шлифовании инструментальных сталей и твердых сплавов рабочие поверхности алмазных шлифовальных кругов засаливаются.

Однако с применением комбинированной электроалмазной обработки (КЭАО) отпадает необходимость в дополнительном времени на правку засаленной поверхности круга, так как она осуществляется автоматически и непрерывно с помощью специального безыносного катода. КЭАО заключается в одновременной непрерывной правке поверхности шлифовального круга и анодном растворении удаляемого припуска обрабатываемой поверхности шлифуемого изделия.

Следует отметить, что высокая эффективность этого метода достигается благодаря резкому улучшению режущих свойств алмазных кругов, которые поддерживаются непрерывной правкой круга, включаемой автоматически при включении главного привода станка (цепь II). Электрическая цепь I также включается автоматически при начале движения подачи (рис. 1).

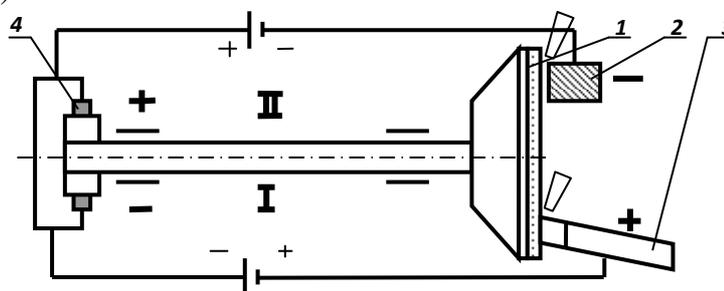


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема КЭАО:  
1 – алмазный круг; 2 – катод; 3 – резец; 4 – токосъёмник

Рентгеновский энерго-дисперсионный анализ химического состава засаленного слоя показал, что обработка материалов без подключения электрохимических процессов приводит к возникновению диффузии на контактирующих поверхностях и адгезионному схватыванию разнородных материалов. Этому способствует высокое давление в зоне резания и, очевидно, ван-дер-ваальсовы силы притяжения, действующие при расстояниях между твёрдыми объектами меньше  $\sim 100 \text{ \AA}$  ( $\sim 0.01 \text{ \mu m}$ ). Пики входящих в состав связки круга элементов Sn и Cu практически отсутствуют или наблюдаются на уровне фона. Образец содержит только пик C, который принадлежит алмазу и пик O, позволяющий предположить наличие окислительных процессов. В то же время в составе засаленного слоя в большом количестве присутствуют элементы основных компонентов инструментального материала – Mn, Fe, Cr и Si. Это свидетельствует о том, что они без изменений диффундировали с поверхности затачиваемых пластин на поверхность круга.

Анализ поверхности круга, полученный после КЭАО показал, что с небольшой разницей пиков Sn и Cu сканограмма наиболее приближена к эталону. Следовательно, образование засаленного слоя на поверхности алмазных шлифовальных кругов можно предотвратить путём подбора электрических режимов КЭАО, нейтрализующих или смягчающих воздействие диффузионных и адгезионных явлений.

Таким образом электроалмазная обработка обеспечивает высокую производительность труда, улучшает качество инструмента. Применение этого метода обработки позволяет сократить расход алмазов, создавать принципиально новые высокопроизводительные конструкции изделий из инструментальных сталей [3].

#### Библиографический список

1. Захаров Л.А. Повышение эффективности шлифования абразивными брусками плоских поверхностей. – Брянск, 2004. – 146с.

2. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин; под. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.

3. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: монография / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Е.В. Васильев, А.Ю. Попов; под ред. А.С. Янюшкина. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 228с.

Е.А. Галуцкий, Н.П. Петров, А.Г. Широков

*Братский государственный университет*

## **ЗАТАЧИВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

История развития обработки металлов показывает, что одним из эффективных путей повышения производительности труда в машиностроении является применение новых инструментальных материалов. Например, применение быстрорежущей стали вместо углеродистой инструментальной, позволило увеличить скорость резания в 2...3 раза. Это потребовало существенно усовершенствовать конструкцию металлорежущих станков, прежде всего увеличить их быстроходность и мощность. Аналогичное явление наблюдалось также при использовании в качестве инструментального материала, новых композиционных твердых сплавов.

В настоящее время постоянно ведется работа в направлении создания максимально универсальных инструментальных материалов, которые смогли бы обеспечить высокие эксплуатационные показатели металлообрабатывающего инструмента при разнообразном характере условий его эксплуатации. Заточивание современных инструментальных материалов в настоящее время является актуальной проблемой в машиностроении и требует дальнейших исследований.

Значительное превышение твердости инструментального материала по сравнению с твердостью обрабатываемой заготовки должно сохраняться и при нагреве инструмента в процессе резания. Способность материала инструмента сохранять свою твердость при высокой температуре нагрева определяет его красностойкость (тепlostойкость). Режущая часть инструмента должна обладать большой износостойкостью в условиях высоких давлений и температур. Важным требованием является также достаточно высокая прочность инструментального материала, так как при недостаточной прочности происходит выкрашивание режущих кромок либо поломка инструмента, особенно при их небольших размерах. Инструментальные материалы должны обладать хорошими технологическими свойствами, т.е. легко обрабатываться в процессе изготовления инструмента и его переточек, а также быть сравнительно дешевыми.

В настоящее время для изготовления различных конструкций режущих инструментов применяются инструментальные стали (углеродистые, легированные и быстрорежущие), твердые сплавы, минералокерамические материалы, алмазы и другие сверхтвердые и абразивные материалы.

Одной из главных проблем при изготовлении является формообразование режущей кромки. Форма режущей кромки и схема резания взаимосвязаны, формируются и зависят от величины снимаемого припуска, режимов резания, формы детали, способа обработки. В процессе изготовления режущих инструментов следует также учесть способы дробления и отвода стружки, которые зависят от вида обработки (черновая, чистовая, резание в сплошном материале), свойств материала, режимов резания. Способы крепления режущих элементов и всего режущего инструмента выбираются с учетом типа инструмента, его размеров, режимов резания, вида обработки и типа станка.

Подвод в зону резания смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) зависит от условий обработки и осуществляется в основном по двум схемам: внешний подвод СОТС и по каналам в корпусе режущего инструмента. В процессе резания из-за нестабильности сил резания возникают вибрации, что приводит к ухудшению качества обработанной поверхности. Для устранения вибраций в конструкциях инструментов применяются различного типа устройства для уменьшения амплитуды колебаний режущей кромки.

Затачивание поверхностей инструмента и режущих лезвий является важным этапом подготовки режущего инструмента к работе. От качества затачивания зависят условия протекания процесса резания, эксплуатационные характеристики инструмента, качество изготовленной продукции, в конечном итоге его стойкость.

С появлением комбинированных методов обработки, на основе электрохимических методов основанных на анодном растворении поверхностных слоёв металла и электроэрозионных методов, область применения кругов на металлической связке для затачивания режущих инструментов значительно расширилась. К таким методам относятся алмазно-электроэрозионное шлифование, алмазно-электрохимическое шлифование, алмазное шлифование с непрерывной правкой круга и электроалмазное шлифование с непрерывной правкой круга.

Состояния режущих кромок твёрдосплавного инструмента после различных методов затачивания представлены на (рис. 1). Поверхности твёрдосплавного инструмента, затаченные методом электрохимического шлифования (рис. 1, а), по внешнему виду дефектны, с сильно растравленными участками. Режущая кромка затаченных пластин неровная, с большими радиусами округления. При затачивании твёрдосплавного инструмента абразивным инструментом на металлической связке с непрерывной электрохимической правкой круга на режущей кромке также наблюдаются сколы, вырывы твердого сплава, размеры которых составляют 10...15 мкм (рис. 1, б). После затачивания твёрдосплавного инструмента комбинированным методом электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой поверхности круга режущая кромка имеет неглубокие зазубрины и сколы. Дефекты обработанных поверхностей после затачивания таким методом имеют значительно меньшие размеры, чем у инструментов, затаченных другими методами. Размеры этих дефектов составляют не более 2...5 мкм (рис. 1, в). [1]

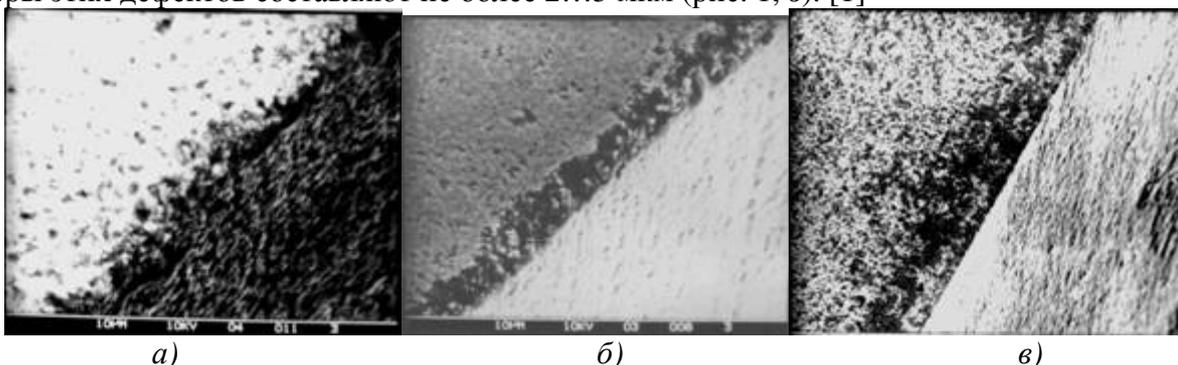


Рис. 1. Состояние режущих кромок твёрдосплавного инструмента после различных методов затачивания (x1600)

а) затачивание методом алмазного электрохимического шлифования; б) алмазное затачивание с непрерывной электрохимической правкой круга; в) электроалмазное затачивание комбинированным методом

Применение данного метода при затачивании твёрдосплавного инструмента вместо традиционного затачивания позволит улучшить качество режущего инструмента, увеличить его стойкость, повысить качество выпускаемой продукции.

#### Библиографический список

1. Яношкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твёрдосплавных инструментов /.- М.: Машиностроение, 2003. – 242 с.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Вывод формулы для расчета интенсивности съема металла зерном и шлифовальным кругом (т.е. объема снимаемого за 1 секунду) рассмотрим на примере операции плоского шлифования периферией круга (рис. 1).

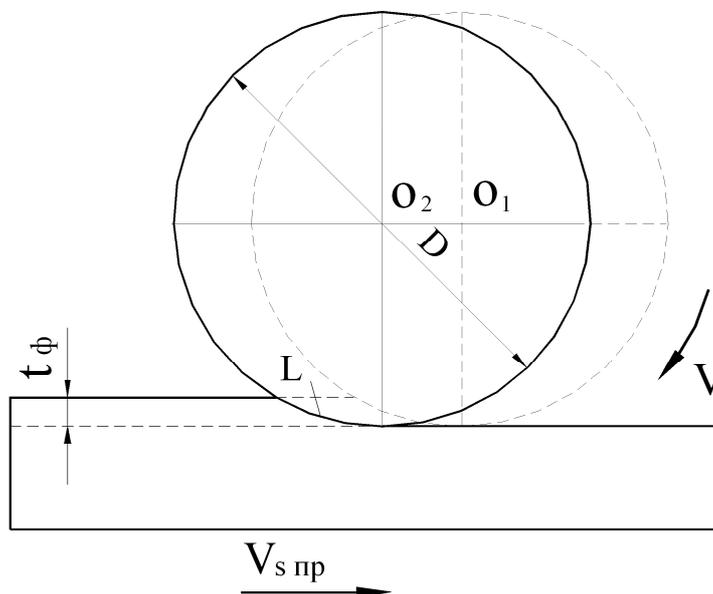


Рис. 1. Схема плоского шлифования периферией круга

Объем металла удаляемый шлифовальным кругом за один его оборот определяется по формуле (рис.2.4):

$$W_{об}^к = V_{s пр} \cdot \tau_{об} \cdot L \cdot S_x = V_{s пр} \frac{\pi D}{V} L \cdot S_x, \quad (1)$$

где  $V_{s пр}$  – скорость продольной подачи, м/мин;  $\tau_{об}$  – время одного оборота круга, мин;  $L$  – длина дуги контакта круга с заготовкой, м;  $S_x$  – поперечная подача круга на ход (ширина шлифования), м;  $D$  – наружный диаметр шлифовального круга, м;  $V$  – скорость шлифовального круга, м/с.

Учитывая большой радиус кривизны дуги контакта, примем допущение о том, что ее образующая является прямой линией. Тогда объем металла срезанный кругом за один оборот ( $a_{об} S_x L$ ) можно представить в форме параллелепипеда с основанием  $ABGH$  (рис. 2).

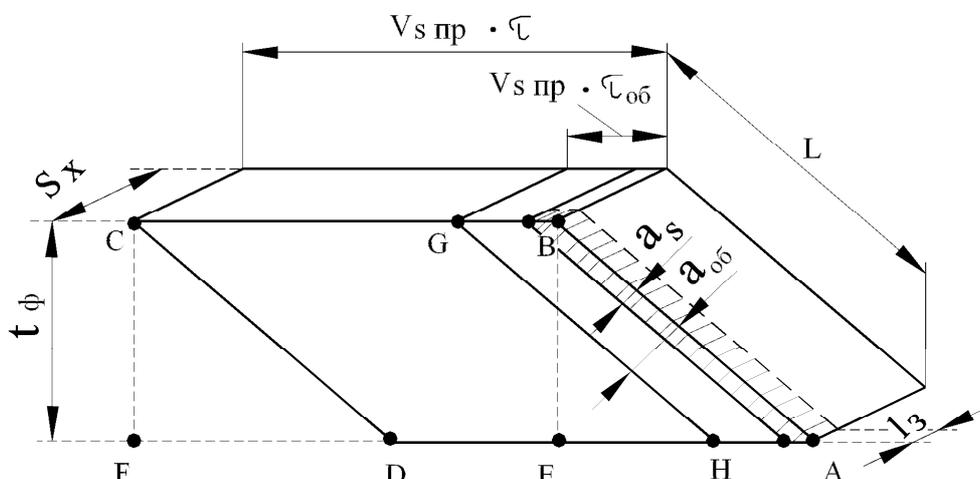


Рис. 2. Схема срезов металла кругом и зерном при шлифовании

Объем металла  $W_{об}^K$  срезается несколькими режущими зёрнами, которые расположены на рабочей поверхности круга. Число режущих зёрен на рабочей поверхности круга равно произведению площади поверхности на концентрацию зёрен:

$$N_i = \pi D \cdot S_x \cdot K_o, \quad (2)$$

где  $K_o$  – концентрация зёрен на рабочей поверхности круга, шт/м<sup>2</sup>.

Объем металла срезанный одним зерном за один оборот круга составит:

$$W_{ср}^3 = \frac{W_{об}^K}{N_i} = \frac{V_{спр} \pi D L S_x}{V \cdot \pi D S_x K_o} = \frac{V_{спр} L}{V \cdot K_o}. \quad (3)$$

Принимая длину среза единичным зерном равной длине дуги контакта  $L$ , а ширину среза равной ширине площадки затупления на зерне  $l_3$ , получим формулу для расчета площади среза металла зерном (по ширине среза):

$$F_{ср} = L \cdot l_3. \quad (4)$$

Разделив объем металла срезанный зерном за один оборот круга  $W_{ср}^3$  на площадь среза металла зерном  $F_{ср}$  (по ширине среза) получим толщину среза металла зерном:

$$a_S = \frac{W_{ср}^3}{F_{ср}} = \frac{V_{спр}}{V K_o \cdot l_3}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что при постоянном снимаемом объеме металла  $W_{ср}^3$  с увеличением скорости продольной подачи  $V_{спр}$  толщина среза металла зерном  $a_S$  увеличивается, а с увеличением концентрации зёрен  $K_o$  и ширины площадки затупления  $l_3$  – уменьшается.

Объем одного среза металла зерном можно выразить через его толщину  $a_S$ , длину  $L$  и ширину  $l_3$ :

$$W_{ср}^3 = a_S \cdot L \cdot l_3 = \frac{V_{спр} L}{V K_o}. \quad (6)$$

Общее количество срезов металла сделанных зерном за 1 секунду можно определить по формуле:

$$n' = n \cdot \tau, \quad (7)$$

где  $n$  – частота вращения круга, с<sup>-1</sup>;  $\tau = 1$  – интервал времени, с.

Учитывая выражение (7), общий объем металла, срезанный одним зерном за 1 секунду, составит:

$$W^3 = \frac{V_{спр} L n \tau}{V K_o}. \quad (8)$$

Тогда интенсивность съема металла зерном (т.е. объем металла срезанный за 1 секунду) составит:

$$Q_3 = \frac{W^3}{\tau} = \frac{V_{спр} L n}{V K_o}. \quad (9)$$

Умножая интенсивность съема металла зерном  $Q_3$  на общее количество режущих зёрен  $N_i$  (2) получим интенсивность съема металла шлифовальным кругом:

$$Q_i = Q_3 \cdot N_i = V_{спр} \cdot L \cdot S_x. \quad (10)$$

Согласно рис. 2 объем параллелепипеда с основанием  $ABCD$  равен объему параллелепипеда с основанием  $EBCF$ , т. е. формулу (10) для расчета интенсивности съема металла шлифовальным кругом можно записать следующим образом:

$$Q_i = V_{s\text{ пр}} \cdot t_{\text{ф}} \cdot S_x, \quad (11)$$

где  $V_{s\text{ пр}}$  – скорость продольной подачи, м/мин;  $t_{\text{ф}}$  – фактическая глубина резания кругом, м;  $S_x$  – поперечная подача круга на ход (ширина шлифования), м.

Таким образом, полученные формулы (10) и (11) показывают, что интенсивность съема металла шлифовальным кругом с одной стороны складывается из объемов металла удаленных режущими зернами в единицу времени, а с другой стороны выражается через параметры режима резания.

А.Г. Широков, Н.П. Петров, Е.А. Галуцкий

*Братский государственный университет*

## **ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

Рабочие процессы в современных машинах характеризуются высокими значениями температур, нагрузок, давлений, скоростей. Часто детали машин из обычных конструкционных материалов в таких условиях оказываются неработоспособными. В связи с этим все большее внимание в машиностроении получают легированные стали, обладающие специфическими свойствами и характеризующиеся высокими значениями твердости, прочности, красностойкости, стойкости против коррозии в различных агрессивных средах.

Легированные стали – сплавы на основе железа, в состав которых специально введены легирующие элементы. Легирующие элементы должны быть требуемого строения, структуры, физико-химических и механических свойств. К ним относятся следующие химические элементы - Mn, Si, Cr, Ni, Mo, W, Co, Cu, Ti, V и другие, которые характеризуются низкими показателями обрабатываемости резанием. Проблемы, связанные с обработкой легированных сталей и сплавов, определяются, прежде всего, физико-химическими и механическими свойствами этих материалов. Поиск путей и методов определения и улучшения шлифования указанных материалов – задача актуальная и имеет большое народнохозяйственное значение.

Процесс шлифования характеризуется абразивной обработкой материалов, который приводит к выравниванию микрогеометрии и снижению шероховатости обрабатываемой поверхности.

Проблемы которые возникают при шлифовании зависят в первую очередь от состава обрабатываемой поверхности и характеристик исходного материала – хуже всего обработке поддаются высокопрочные и труднообрабатываемые материалы, в частности легированные стали. При шлифовании или полировании легированной стали инструменты для ее обработки быстро изнашиваются.

Новым направлением при шлифовании является использование алмазных шлифовальных кругов на металлической связке, которые обладают высокой теплостойкостью и технологической стойкостью. Поверхность нового круга представлена на (рис. 1). Однако, алмазные круги на металлической связке пока не нашли широкого применения в промышленности, из-за склонности к засаливанию поверхности алмазного круга и практически полной потери режущей способности. Поверхность алмазного круга после обработки легированной стали представлена на (рис. 2 и рис.3). Следует считать, что засаливание является следствием механических, физических и химических процессов, происходящих в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой, исследованию которых посвящены работы Г. В. Бокучавы, С. Н. Корчака, Ю. В. Полянскова, Ю. М. Правикова, Г. И. Саютина, С. С. Силина, В. Д. Сильвестрова, Л. В. Худобина, В. А. Хрулькова, В. А. Шальнова, В.П. Споленцева, Ю.С. Степанова, А.М. Козлова и других исследователей.



Рис. 1. Поверхность нового (до работы) алмазного круга АС6 125/100 М1 -100%

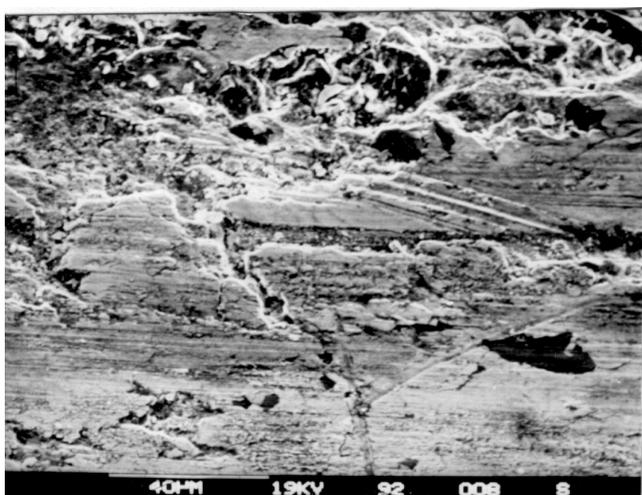


Рис. 2. Поверхность алмазного круга АС6 125/100 М1 -100% (после обработки легированной стали)

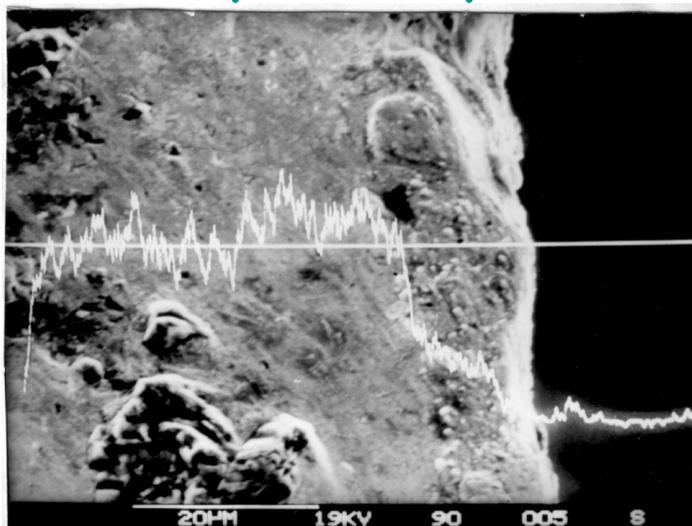


Рис. 3. Поперечный разрез алмазного круга после работы, сканирование по меди слева – алмазный круг; справа – засаленная поверхность

Делаются попытки теоретического описания процесса возникновения засаленного слоя, но это явление недостаточно изучено. Необходимость описания процесса засаливания заключается в возможности дальнейшего управления и исключения его влияния на качество обработки и на режущую способность шлифовального круга. Применение алмазных шлифовальных кругов затруднено их склонностью к быстрому засаливанию в процессе обработки. Легированные стали обладают хорошими эксплуатационными характеристиками и являются незаменимыми в машиностроении. Но их обработка остается проблемой и на сегодняшний день. Поэтому существуют перспективы продолжения исследования их обрабатываемости. Особое внимание следует уделять поиску новых и совершенствованию существующих путей и методов повышения производительности обработки этих материалов. Существенное улучшение процесса шлифования можно достичь применением современных комбинированных способов, основанных на электрофизических и электрохимических методах обработки.

С появлением комбинированных методов обработки, на основе электрохимических методов основанных на анодном растворении поверхностных слоёв металла и электроэрозионных методов, область применения кругов на металлической связке значительно расширилась. К таким методам относятся алмазно-электроэрозионное шлифование, алмазно-электрохимическое шлифование, алмазное шлифование с непрерывной правкой круга и электроалмазное шлифование с непрерывной правкой круга [1, 2].

#### **Библиографический список**

1. Янюшкин А.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании ( А.С. Янюшкин, В.С.Шоркин / . – М.: Машиностроение, 2004.-230 с.
2. Янюшкин А.С. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей (А.С. Янюшкин и др.).

**П.В. Архипов, Г.Е. Потапова**

*Братский государственный университет*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ПРИ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Современные твердые сплавы на основе тугоплавких соединений углерода, азота с вольфрамом, титаном, танталом, ниобием и другими материалами в сочетании с легкоплавкой связкой (кобальтом, никелем) характеризуются рядом уникальных свойств [4]. Благодаря этим свойствам твердые сплавы широко используются в современной технике в качестве конструкционных материалов для изготовления деталей машин и механизмов, подверженных повышенному износу, приборов, устройств с высокими статическими и динамическими нагрузками, в качестве кислотоупорных, жаростойких и жаропрочных материалов и т.д.

Финишная обработка таких материалов оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства, долговечность и надежность работы деталей машин. Долговечность и надёжность деталей машин во многом зависит от технологического процесса их изготовления, параметров и показателей качества поверхностного слоя, а также ряда других причин.

С точки зрения производительности процесса, качества обработанной поверхности, в том числе прочностных показателей, целесообразно применять электрохимическую размерную обработку. В этом случае алмазный инструмент, обладая высокой режущей способностью и большой износостойкостью, расширяет возможности электрохимического шлифования. Особенно это проявляется при обработке спеченных твердых сплавов, например, ВК8, Т15К6 и др. [4].

Для определения зависимости качества твердых сплавов от режимов комбинированного электроалмазного шлифования нами спланированы и проведены исследования шероховатости обработанной поверхности твердых сплавов на примере сплавов группы ВК.

Шероховатость поверхности образцов после шлифования измерялась с помощью профилограф – профилометра «АБРИС – ПМ7». Технические возможности прибора позволяют измерять профиль микронеровностей по нескольким параметрам одновременно:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $t_p$  и выполнить автоматический расчет среднего значения, вывести на монитор или на печать результаты измерений.

На первом этапе исследования был спланирован и поставлен полный факторный эксперимент типа  $2^4$  [1, 3]. Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных поисковых экспериментов [2].

Факторы, уровни и интервалы варьирования выбраны исходя из рекомендаций литературных источников, а также условий обеспечения рациональной работы оборудования и инструмента, которые сведены в табл.1.

Таблица 1

Кодирование факторов

Уровни и интервалы варьирования	Продольная подача $S_{np}, м/мин$	Глубина шлифования $t, мм/дв.ход$	Плотность тока травления $i_{mp}, А/см^2$	Плотность тока травления $i_{np}, А/см^2$
	Кодовое обозначение			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Верхний уровень «+»	6	0,03	15	0,3
Нижний уровень «-»	2	0,01	5	0,1
Интервал варьирования	2	0,01	5	0,1
Нулевой уровень	4	0,02	10	0,2

План эксперимента и результаты измерений величины шероховатости  $R_a(Y)$  представлены в табл. 2.

Таблица 2

План – матрица эксперимента

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	$R_a(\bar{Y}_j)$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,16
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	0,16
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	0,35
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	0,33
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	0,29
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	0,2
7	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	0,16
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	0,13
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	0,26
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,28
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	0,22
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	0,15
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	0,27
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	0,32
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	0,25
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	0,14

План типа  $2^4$  позволяет получить отдельные оценки для уравнения регрессии вида [1, 3]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 \quad (1)$$

При обработке результатов эксперимента для каждой строки матрицы планирования по результатам  $m = 3$  параллельных опытов определяем  $\bar{Y}_j$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m Y_{ju},$$

где  $u$  – номер параллельного опыта;  $Y_{ju}$  – натуральное значение измеряемой величины в  $u$  – м параллельном опыте  $j$  – й строки матрицы.

С целью оценки отклонений измеряемой величины для каждой строки матрицы планирования вычисляем среднее значение квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения – статистическую дисперсию  $S_j^2$  по данным  $m = 3$  параллельных опытов:

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{u=1}^m (Y_{ju} - \bar{Y}_j)^2$$

Однородность дисперсий проверяется по критерию Кохрена. Отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2}$$

сравнивается с табличным значением  $G_{1-p}(f_1, f_2)$  для  $p = 0,05$  и чисел степеней свободы  $f_1 = m - 1$  и  $f_2 = N$ . При условии, что  $G \leq G_{1-p}(f_1, f_2)$ , то выборочные дисперсии однородны. Тогда оценкой дисперсии воспроизводимости будет средневзвешенная дисперсия:

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2$$

с числом степеней свободы  $f_{\text{воспр}} = N(m - 1)$ .

По результатам эксперимента вычисляем коэффициенты модели. Свободный член  $b_0$  определяем по формуле:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты, вычисляем по выражению:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \bar{Y}_j.$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия, определяем по формуле:

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{lj} \bar{Y}_j,$$

где  $i, l$  – номера факторов;  $X_{ij}, X_{lj}$  – кодированные значения факторов  $i$  и  $l$  в  $j$ -м опыте.

Проверку значимости коэффициентов производим способом сравнения абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом. Для этого вычисляем дисперсии коэффициентов регрессии. Дисперсию  $i$ -го коэффициента определяем по выражению:

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{mN} S_j^2.$$

Доверительный интервал  $\Delta b_i$  находим по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t_T S\{b_i\},$$

где  $t_T$  – табличное значение критерия при  $p = 0,05$  уровне значимости и числе степеней свободы  $f = N(m - 1)$ ,  $S\{b_i\}$  – ошибка в определении  $i$ -го коэффициента регрессии, вычисляется по формуле:

$$S\{b_i\} = \pm \sqrt{S^2\{b_i\}}$$

Статистически незначимые коэффициенты могут быть исключены из уравнения.

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определяем дисперсию  $S_{ad}^2$  адекватности. Дисперсия адекватности, характеризует рассеяние эмпирических значений  $Y$  относительно расчетных  $\tilde{Y}$ , определенных по найденному уравнению регрессии. Дисперсию адекватности определяем по критерию Фишера и она равна:

$$S_{ad}^2 = \frac{m \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - \tilde{Y}_j)^2}{N - l},$$

где  $\bar{Y}_j$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины в  $j$ -м опыте;  $\tilde{Y}_j$  – значение измеряемой величины, вычисленное по модели для условий  $j$ -го опыта;  $l$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии.

Уравнение адекватно эксперименту, если

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{воспр}^2} \leq F_{1-p}(f_{ad}, f_{воспр}),$$

Проверка однородности с помощью G-критерия Кохрена показала, что дисперсии не однородны т.к.  $G_p = 0,5071 > G_{1-p}(f_1, f_2) = 0,2758$ , а это указывает, что исследуемая величина  $R_a(\bar{Y})$  не подчиняется нормальному закону. Исследуемая зависимость не может быть с достаточной точностью аппроксимирована уравнением (1).

Поэтому требуется повысить порядок аппроксимации неизвестной функции отклика в полином вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + \\ + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2.$$

Следовательно, формирование шероховатости обработанной поверхности твердых сплавов группы ВК имеет нелинейную зависимость от рассматриваемых факторов комбинированного электроалмазного шлифования.

Таким образом, выполненные исследования необходимо продолжить и для достижения поставленной цели, эксперимент может быть поставлен по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Для этого требуется реализовать шестнадцать опытов полного факторного эксперимента  $2^4$  и дополнить семью опытами в центре плана.

#### Библиографический список

1. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов/В.А.Рогов, Г.Г. Позняк. – М.: Академия, 2005. – 288с.

2. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2000. – 684с.

3. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184с.

4. Янющкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 242 с.: ил.

С.А. Зеньков, К.А. Игнатьев, А.С. Филонов, А.А. Черных

*Братский государственный университет*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С АДГЕЗИЕЙ ГРУНТОВ**

При разработке влажных связных грунтов (особенно при отрицательной температуре) налипание и намерзание грунта на рабочие органы существенно снижает производительность машин. Снижение производительности происходит из-за уменьшения полезной вместимости ковшей и за счет неполной разгрузки, из-за роста как лобового сопротивления при резании (копани) в результате прилипания влажного грунта к рабочему органу, так и сопротивления входа в ковш, а также увеличения простоев машин вследствие необходимости очистки органов.

Существует четыре группы методов устранения адгезии грунтов к поверхностям рабочих органов землеройных машин: методы создания на границе контакта промежуточного слоя, методы способствующие ослаблению адгезионных связей за счет внешнего (интенсифицирующего) воздействия, конструктивно-технологические методы, комбинированные методы. По характеру и принципу действия методы и средства для борьбы с прилипанием и примерзанием грунтов к рабочим органам землеройных машин можно разделить на профилактические средства (предотвращение адгезии) и средства для очистки ковша (восстановление эвакуирующей способности грунта).

Прямой пьезоэлектрический эффект был открыт братьями Жаком и Пьером Кюри в 1880 году, а обратный эффект был предугадан в 1881 г. Липпманом на основе термодинамических соображений и в том же году экспериментально подтвержден братьями Кюри. Для борьбы с адгезией используется обратный пьезоэлектрический эффект.

Работа пьезопреобразователя основана на обратном пьезоэлектрическом эффекте, а именно на преобразовании электрической энергии в механическую. Пьезоэлектрический эффект (как прямой, так и обратный) возникает из-за связи между электрическими и механическими свойствами материала, обычно – кристаллического. Когда к пьезоэлектрику прикладывается механическое напряжение, он поляризуется в указанном направлении, и между его гранями появляется электрическая разность потенциалов. Величина механического напряжения, приложенного к кристаллу, прямо связана с величиной его деформации, а, следовательно, и с разностью потенциалов между его гранями. Если к пьезоэлектрику прикладывается электрический потенциал, то поляризация пьезоэлектрика во внешнем электрическом поле порождает изменение его размеров и механическое воздействие на окружение. Таким образом, подача электрического напряжения приводит к расширению (либо сжатию) пьезопреобразователя, что и является сутью его работы. Пьезопреобразователь является одним из вариантов электродвигателя. К достоинствам пьезопреобразователя относятся его простота – как в изготовлении, так и в использовании. К недостаткам – малые величины сдвига. В ряде случаев, необходимо учитывать влияние в таких устройствах прямого пьезоэффекта – преобразование деформаций кристалла, вызванных внешними силами, в напряжение. Для того, чтобы увеличить создаваемые пьезопреобразователем силы и смещения, используются более сложные конструкции. Базовые типы пьезоэлектрических структур включают в себя трубки, униморфы и биморфы. Пьезотрубки являются полезными приборами для точного управления положением объекта в пространстве. Секционируя поверхность трубки на четыре области и соединяя их и концы трубки с электродами, можно прикладывать напряжение к трубке в различных направлениях. Прикладывая напряжение поперек трубки можно контролировать положение ее конца в двух

направлениях, тогда как прикладывая напряжение вдоль трубки можно управлять положением ее конца вдоль третьей координаты. Поскольку сила и смещение, порожденные чистым пьезоэлектрическим материалом, относительно малы, был разработан метод для усиления пьезоэлектрического эффекта. Один подход (известный как униморф) заключается в нанесении тонкой пленки пьезоэлектрика на слой неактивного материала. Когда пьезоэлемент растягивается или сжимается, вся конструкция изгибается. Комбинируя несколько пьезоэлементов, можно еще больше увеличить перемещение. Например, удлиняющиеся, сгибающиеся или скручивающиеся элементы могут быть сконструированы нанесением двух слоев пьезоэлектрического материала один на другой с контролем направления поляризации и приложенного напряжения так, что когда один слой сжимается, другой расширяется. Такая конструкция известна как биморф.

Данная работа направлена на исследование возможности применения пьезокерамических излучателей для борьбы с адгезией грунтов к рабочим органам землеройных машин (рис. 1).



Рис. 1. Пьезокерамический преобразователь

Для проведения экспериментов в качестве источника ультразвуковых колебаний был взят низкочастотный пьезокерамический преобразователь диаметром 50 мм с рабочей частотой  $37 \pm 3,7$  кГц (рис. 2).

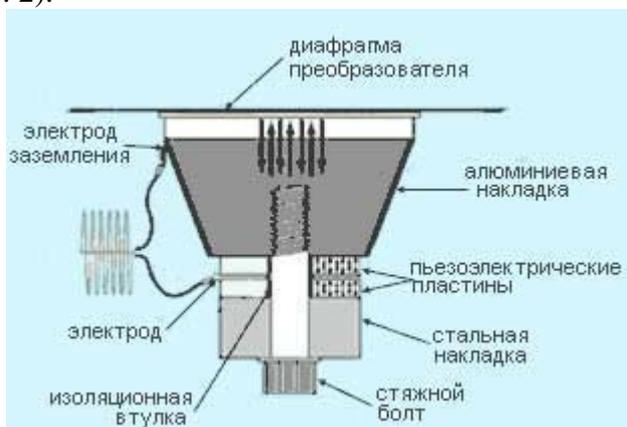


Рис. 2. Схема пьезокерамического преобразователя

Так как пьезокерамический преобразователь при работе нагревается, то его применение относится к группе комбинированных методов устранения адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин.

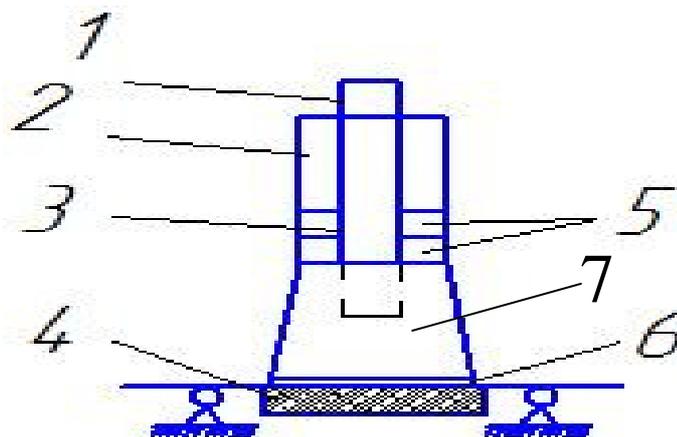


Рис. 3. Схема лабораторного стенда:

1-стяжной болт; 2-стальная накладка; 3-изоляционная втулка; 4-грунтовый образец;  
5-пьезоэлектрические пластины; 6-диафрагма преобразователя; 7-алюминиевая накладка

Эксперименты проводились при различной температуре окружающей среды, для испытаний был взят грунт суглинок дисперсный, связный, различной весовой влажности (7,5%; 12,5%; 17,5%).

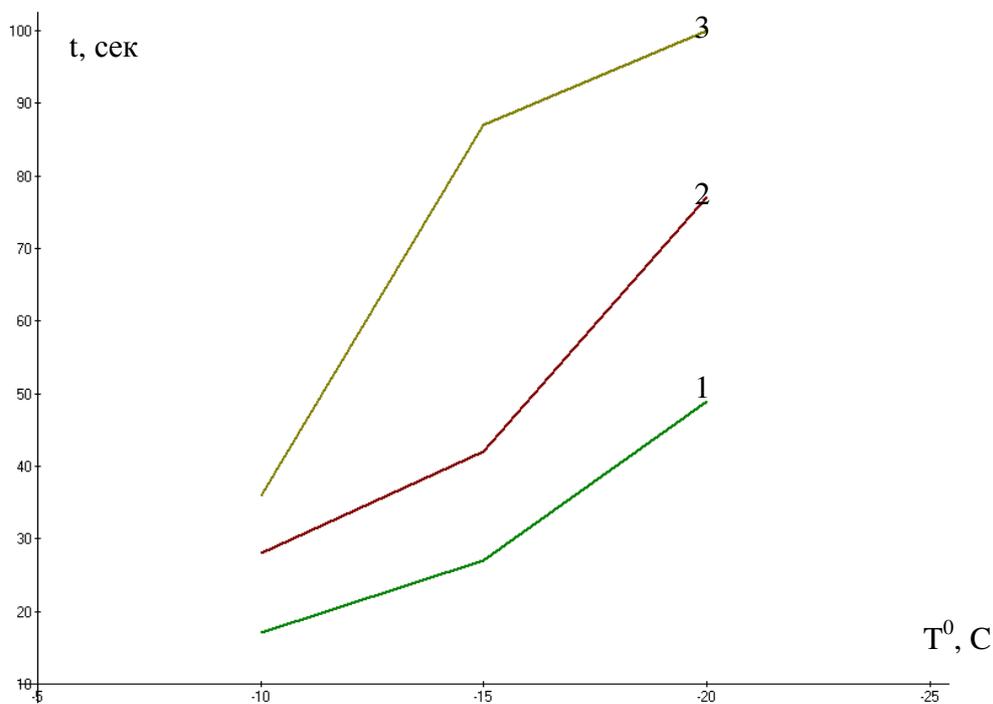


Рис. 4. Зависимости времени отрыва грунта от температуры окружающей среды:

- 1 – влажность грунта 7,5 %, время примораживания 5 мин;
- 2 - влажность грунта 7,5 %, время примораживания 10 мин;
- 3 - влажность грунта 7,5 %, время примораживания 15 мин

Исходный грунт при подготовке к эксперименту подвергается дополнительной обработке для достижения стабильности механических свойств для всей серии экспериментов с данным типом грунта. Подготовка грунта к эксперименту включает:

- доведение весовой влажности грунта до требуемой по условиям эксперимента;
- уплотнение грунта в приборе Союздорнии для стандартного уплотнения по ГОСТ 22733-2002 до  $C_{уд}=3...6$  ударов ударника ДорНИИ.

По данному графику можно сделать вывод о том, что чем ниже температура окружающей среды, тем больше время отрыва грунта от металла. Причем чем меньше влажность грунта, тем больше требуется времени воздействия преобразователя для его отрыва.

Это можно объяснить тем, что у более влажных грунтов прочность примерзания грунта к металлу обуславливается прочностью льда.

Использование пьезокерамических преобразователей позволяет снизить адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин за счет теплового и вибрационного воздействия поверхности контакта

Применяемый в данных экспериментах пьезокерамический преобразователь имеет излучающую поверхность диаметром  $\varnothing$  50 мм, соответственно их можно размещать в местах наибольшего налипания и намерзания грунта, что дает наибольший эффект в борьбе с адгезией.

#### **Библиографический список**

1. Ультразвуковые электротехнологические установки/ А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982 – 208 с., ил.
2. <http://www.heuristic.su/effects/catalog/tech/byId/description/737/index.html>