

Технология изготовления ячеек вафельной конструкции на изделиях из композиционных фотополимерных материалов

Н.Г. Филиппенко^{1a}, Т.Т. Чумбадзе^{1b}, С.К. Каргапольцев^{2c}

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

^a ifpi@mail.ru, ^b tamriko98@yandex.ru, ^c kck6262@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1009-4616>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Статья поступила 20.01.2025, принята 20.03.2025

В современных условиях изготовление вафельной конструкции для различных изделий осуществляется различными способами механической обработки ребер жесткости с использованием специального оборудования. При этом ключевым вопросом остается выбор подходящей схемы обработки для плоской или изогнутой детали. Данная проблема обусловлена высокими требованиями к точности выполнения вафельной структуры, включая соблюдение допуска массы и обеспечение геометрического качества ячеек. Эти параметры оказывают значительное влияние на способность конструкции выдерживать расчетные нагрузки. Последние десятилетия полимерные материалы, приходя на смену традиционным, выполненным из металлов и их сплавов, несмотря на несомненные преимущества, связанные с их коррозионной стойкостью, антимагнитными и изоляционными свойствами, испытывают затруднения с их применением в высоконагруженных тонкостенных конструкциях. Технология, предлагаемая авторами в данной работе, позволяет повысить прочностные характеристики изделий из полимерных композитных материалов более чем на 10 %. Предлагаемый оригинальный прием рассеивания засвечивающего излучения, используемого в фотолитографической технологии аддитивной печати, позволил авторам обосновать применение данной технологии изготовления упрочняющей конструкции типа вафельного поля с сохранением геометрии и массы ячеек. Апробация разработанной авторами технологии позволила изготовить вафельную конструкцию с микроячейками 0,2х0,2 мм, что позволило увеличить твердость изделия 12,3 %. Авторами определены перспективные возможности использования разработанной технологии изготовления ячеек вафельной конструкции на изделиях из композиционных фотополимерных материалов для получения сетчатых конструкций с улучшенными массогабаритными и прочностными характеристиками изделий.

Ключевые слова: технология; вафельная конструкция; фотолитографии; транспортные средства; фотополимер.

Manufacturing technology of wafer-type cells on products made of composite photopolymer materials

N.G. Filippenko^{1a}, T.T. Chumbadze^{1b}, S.K. Kargapoltsev^{2c}

¹Irkutsk State Transport University, ul. Chernyshevskogo, 15, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, Russia

^a ifpi@mail.ru, ^b tamriko98@yandex.ru, ^c kck6262@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-7557-7774>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-1009-4616>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>

Received 20.01.2025, accepted 20.03.2025

In modern manufacturing, waffle structures for various products are produced using different methods of mechanical processing of stiffening elements with specialized equipment. A key challenge remains the selection of an appropriate processing scheme for flat or curved components. This issue arises due to the high precision requirements for the waffle structure, including mass tolerance compliance and the geometric quality of the cells. These parameters significantly affect the structure's ability to withstand the calculated loads. In recent decades, polymer materials have been increasingly replacing traditional metals and alloys. Despite their undeniable advantages, such as corrosion resistance, non-magnetic properties, and insulation characteristics, their application in highly loaded thin-walled structures faces challenges. The technology proposed by the authors in this study enables an improvement of over 10% in the strength characteristics of polymer composite products. The authors' original method of scattering the exposure radiation used in photolithographic additive printing technology has substantiated the application of this manufacturing approach for reinforcement structures of the waffle type while maintaining the geometry and mass of the cells. The developed technology was experimentally validated, allowing the fabrication of a waffle structure with microcells of 0.2 × 0.2 mm, which resulted in a 12.3% increase in product hardness. The authors have identified promising opportunities for utilizing the proposed cell fabrication technology in waffle structures made from composite photopolymer materials to create lattice structures with enhanced mass-to-volume and strength characteristics.

Keywords: technology, wafer structure, photolithography, vehicles, photopolymer.

Введение. При изготовлении корпусов, отсеков и различных емкостей [1] летательных аппаратов (ЛА) и других транспортных средств (ТС) снижение массы и повышение прочности являются актуальными задачами, окончательного решения которым еще не найдено. На практике эти задачи решаются за счет внедрения

новых материалов [2, 3] и выбора различных конструкций ребер жесткости (вафельного фона). На сегодняшний день существует ряд технологий получения вафельной конструкции деталей, которые по видам и способам изготовления можно представить следующим образом (рис. 1).

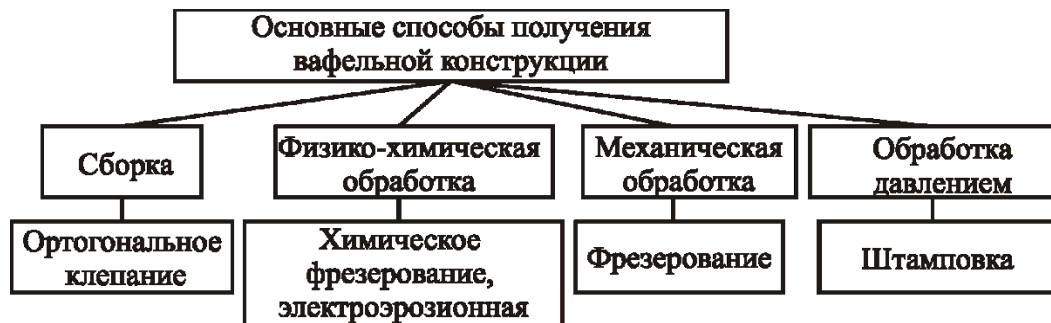


Рис. 1. Способы изготовления деталей с вафельной конструкцией

Постановка цели и задач исследования. Рассмотренные выше технологические процессы изготовления используются в основном для обработки изделий из металлов [4, 5]. Они требуют больших трудозатрат из-за сложности обеспечения точности и малорентабельны вследствие низкого коэффициента использования материала при механической обработке вафельного фона [6–8]. Необходимо отметить, что традиционные конструкционные материалы на основе сплавов различных металлов не всегда удовлетворяют современным требованиям по обеспечению соотношения прочность–вес–цена.

Основная цель исследования заключается в определении и обосновании технологии изготовления изделий из композиционных полимерных материалов с вафельной конструкцией, позволяющей сохранить геометрию и массу ячеек.

Недостатки технологии изготовления прямых и радиусных вафельных конструкций. Существующие варианты исполнения вафельных ячеек в общем случае можно представить в двух вариантах исполнения: прямые, выполненные на плоскости, и цилиндрические, имеющие радиус кривизны. Задающими параметрами вафельной конструкции являются толщина стенок ячейки C и радиус кривизны R , создающий некоторый угол наклона вертикальной стенки ячейки α (рис. 2).

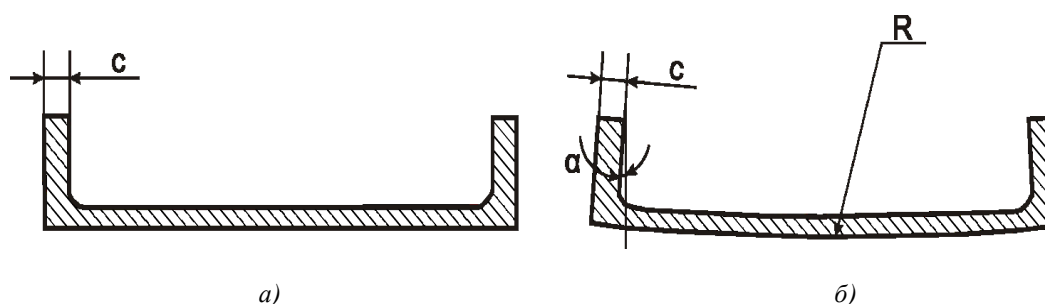


Рис. 2. Конструкции вафельного поля: а – прямая, б – радиусная

Больших трудностей в организации технологических процессов изготовления плоскостных вафельных конструкций в промышленности не возникает [7]. Их обрабатывают одним из способов, представленных на рис. 1, выбор которых определяется исходя из допусков на качество поверхности, габаритных размеров и свойств используемого материала. Там не менее все эти способы ограничены габаритными размерами и сложноприменимы для получения микроячеек размером менее 1 мм.

Изготовление цилиндрических (радиусных) ячеек сопряжено со сложностями, связанными с организацией

процесса механообработки, ввиду неизбежного отклонения от вертикали на угол α ребер ячеек (рис. 3) [9, 10]. Ячейки приобретают фасонные поверхности, обработка которых требует специального подхода, оборудования и инструмента. Изготовление возможно с использованием способа наклонной обработки на многокоординатном оборудовании при помощи специального инструмента для объемной обработки. Все это крайне затратно как по цене, так и по времени, что неизбежно приводит к кратному увеличению стоимости готового изделия [11, 12].

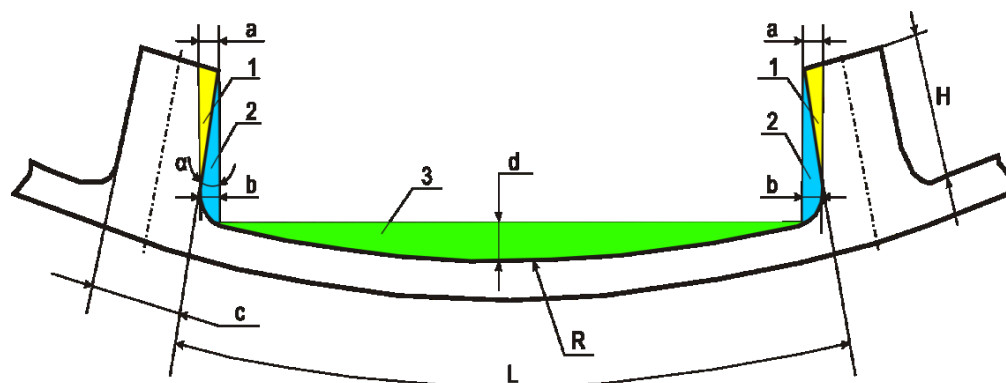


Рис. 3. Процесс упрощенной механообработки цилиндрических (радиусных) ячеек

Снижение себестоимости изготовления за счет упрощения формы вафельной конструкции, а, соответственно, и времени обработки, приведет к увеличению массогабаритных размеров ячейки за счет формирования дополнительного объема материала V , обозначенных позициями 2 и 3 (размером d) на рис. 3. Причем, толщина вертикальной перегородки C возрастает у своего основания на величину b , что приводит к увеличению массогабаритных показателей. Увеличение веса m определяется, исходя из размеров ячеек $L \times L \times H$, их количества в изделии n , радиуса искривления R и показателя плотности выбранного материала ρ по формуле (1), полученной на основе геометрических построений (см. рис. 3).

$$m = \rho \cdot V \cdot n = \rho \cdot [2 \cdot R \cdot (\arcsin \frac{L}{2R}) \cdot d + b \cdot H \cdot \sin \alpha] \cdot n, \quad (1)$$

где m – увеличение веса изделия, ρ – плотности выбранного материала, V – дополнительный объемов материала, n – количества ячеек в изделии, R – радиуса искривления изделия, L – длина ячейки, H – высота вафельной конструкции, d – высота дополнительного объема материала, b – толщина вертикальной перегородки у своего основания, α – угол наклона вертикальной стенки ячейки.

Дополнительно упростить процесс обработки можно путем удаления объема перегородки, обозначенной позицией 1 на рис. 3. В этом случае уменьшится ширина верхней части вертикальной перегородки вафельной конструкции, что приведет к снижению общего веса готового изделия, но такой вариант возможно рассматривать только в случае допусков на размер C , находящихся в разрешенных пределах $C \pm a$.

Таким образом, существующие технологии изготовления вафельных конструкций из металлов методами механообработки обладают рядом недостатков, которые можно нивелировать, используя в качестве материалов полимеры.

Разработка технологии изготовления прямых и радиусных вафельных конструкций из полимерных композитных материалов. Последние десятилетия отмечается развитие технологий производства новых конструкционных материалов на основе полимеров и их композитов. Такие материалы помогают уменьшить массу конструкции, увеличить ее долговечность и разработать совершенно новые детали и изделия сложной геометрии. Например, в ряде изделий авиастроения около 80 % силовых элементов изготавливаются из полимерных композиционных материалов, что позволяет сократить вес на 25-30 % по сравнению с аналогичными изделиями из металлических сплавов. В связи с этим появился и ряд способов обработки полимерных материалов, основные из которых представлены на рис. 4.

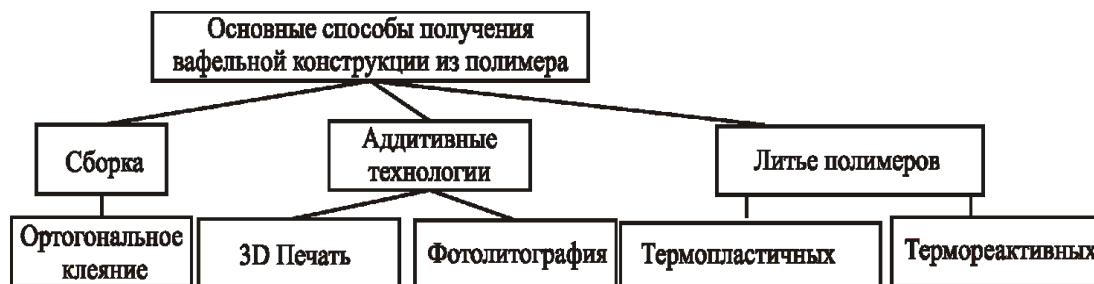


Рис. 4. Способы обработки полимерных материалов при изготовлении вафельных конструкций

Технологии методом сборки и литья изделий получили широкое распространение, тем не менее необходимо отметить, что их возможности ограничены размерами изделий, которые не могут быть меньше определенных значений. Так, например, минимальный размер зубчатых колес не может быть менее 0,5 мм, а миниатюрные элементы, такие как винты для фиксации, составляют порядка 1–5 мм [13–15]

Выбор процесса фотолитографии как наиболее перспективного направления аддитивных технологий был основан на том, что его использование позволяет изготавливать изделия из полимерных композитов не только

ко макро-, но и микро размеров [16]. Так, начиная с 1960-х гг., с помощью технологии фотолитографии производят маски для процессоров, полевых транзисторов и другие элементы современной микроэлектроники. Разрешающая способность фотополимерных композиционных материалов зависит от длины волны засвечивающего излучения. На сегодняшний день технология экстремального ультрафиолетового диапазона (EUV) позволяет получать изделия размерами 13,5 нм.

Рассмотрев технологию фотолитографии, можно видеть, что она проста и включает следующие этапы:

- подготовка и очистка основания подложки, нанесение вспомогательного слоя;
- нанесение фотополимера и его равномерное распределение по поверхности;
- экспонирование ультрафиолетовым излучением через негатив-маску для создания необходимого изделия, в нашем случае – вафельного поля;
- удаление неопровзаимодействующего фотокомпозиита промывкой или сжатым воздухом с последующей очисткой поверхности для следующего этапа.

Такой подход позволяет использовать доступное и недорогое фотолитографическое оборудование, что способствует снижению себестоимости изготовления вафельных и сетчатых конструкций.

Таким образом, приняв данную технологию в качестве основной можно говорить о ней как об универсальной, позволяющей изготавливать вафельные конструкции с ячейками неограниченных размеров и форм.

Более подробно авторы настоящей работы ранее описывали оборудование и технологию получения изображения на поверхности полимерного фотокомпозиита при решении задачи упрочнения изделий методом нанесения растровых микровозвышающих точек [17]. В работе описывается процесс растрового упрочнения, когда при экспонировании поток ультрафиолетовых излучений люминесцентных или газоразрядных ламп, проходящий через прозрачные участки негатива, полимеризует жидкую композицию на элементах, превращая ее в твердый полимер. На пробельных участках, где излучение не оказывало воздействия, композиция остается в жидком состоянии, которую затем вымывают. Для создания основы формы изделия авторы освещают композицию такими же лампами с обратной стороны, что приводит к образованию прочной твердой основы. Повышение твердости изделия из фотополимера на 5–9 % достигалось авторами за счет микровозвышений, получаемых нанесением растровой точки круглого сечения с разрешением 100 dpi. Это можно интерпретировать как создание ребер жесткости (армирование, вафельная конструкция) на поверхности материала. Необходимо отметить, что описанная технология растрового упрочнения схожа с технологическим процессом получения прямого вафельного поля, выполненного на плоскости.

Поэтому следующий этап настоящего исследования был направлен на разработку способа получения вафельной конструкции на цилиндрических поверхностях, т. е. изделиях, имеющих радиус кривизны R (рис. 5).

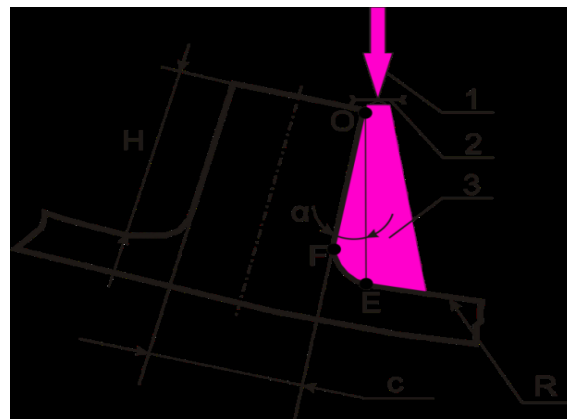


Рис. 5. Способ получения вафельной конструкции на цилиндрических поверхностях

Принцип предлагаемой технологии состоит в том, что создание поднутрения $OE\Phi$ (см. рис. 4) на поверхности, имеющей радиус кривизны R , возможно при помощи отклонения луча УФ-излучения (см. рис. 5, поз. 1) на угол α .

Мы понимали, что отклонение при рассеивании луча θ в полимерном материале будет происходить в любом случае, основываясь на явлении Релеевского рассеяния, определяемого в соответствии с формулой (2) как:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d n}\right), \quad (2)$$

где θ – угол рассеивания, λ – длина волны УФ-излучения, d – характерный размер дефектов или неоднородностей, n – показатель преломления.

Расчеты для используемых фотополимеров и УФ-излучению показали, что максимальной величиной угла рассеивания будет его значение, не превышающее $\theta \leq 0,8^\circ$. Такие величины отклонения для используемых размеров вафельного поля недостаточны, сложно контролируемы и для конкретных материалов являются постоянной величиной.

Обеспечение необходимой и расчетной величины угла рассеивания α стало возможным при добавлении в технологическую систему рассеивающего устройства в виде линзы (см. рис. 5, поз. 2).

Выбор диаметра линзы D определяется и зависит от высоты ребра вафельной конструкции H и угла α . Для фиксированных H и α диаметр линзы рассчитывается по следующей формуле (3):

$$D = 2 \cdot H \cdot \tan \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Фокусное расстояние f для обеспечения заданного угла рассеивания поз. 3 определяют как (4):

$$f = \frac{D}{\alpha}. \quad (4)$$

Апробация разработанной технологии изготовления вафельной конструкции. Апробация осуществлялась на изделиях с прямым вафельным полем, выполненным на призматической детали размером 30×30 мм, высотой 4 мм. В качестве фотокомпозиционного материала был выбран полимер марки ROEHM R-50, основным компонентом которого является полиакрилат. Исследования проводилось с использованием промышленной установки модели AZ 3000 N3.

Размеры вафельного поля определялись исходя из площади заготовки и стенок, толщина последних была выбрана 1 мм, а размеры ячеек составили 3,8×3,8 мм. Негатив (маска) для засветки изготавливался типографским способом на оборудовании для фотовывода пленок офсетной (плоской) печати.

Полученное изделие вафельной конструкции из полимерного композиционного материала представлено на рис. 6.



Рис. 6. Полученное изделие с вафельной конструкцией из полимерного композиционного материала ROEHM R-50

Сравнительный анализ прочностных характеристик полученных изделий из полимерных материалов с вафельной конструкцией и рекомендации по дальнейшему совершенствованию их технологии. На основе анализа приведенных существующих методов определения прочностных характеристик было выявлено, что для полимеров прямая связь между твердостью и пределом прочности менее изучена и обычно не настолько универсальна, как для металлов. Однако полученные показатели твердости на основе эмпирических исследований могут быть использованы для получения ориентировочных данных по прочностным характеристикам изделий с вафельными конструкциями.

Связь между пределом прочности и твердостью носит эмпирический характер и требует уточнения для каждого материала, тем не менее показатель твердости, например по шкале Бренеля (HL), может быть связан с пределом прочности σ_b , например, на растяжение, следующей оценочной формулой (5):

$$\sigma_b = C HB, \quad (5)$$

где σ_b – предел прочности на растяжение, МПа; C – коэффициент, зависящий от материала.

Для определения твердости полимеров применяют различные методы в зависимости от их механических свойств и условий эксплуатации. Измерения твердости по Роквеллу (HR), Бринеллю (HB), Виккерса (HV) применимы для жестких полимеров, в том числе композитов, однако эти способы затруднительны при определении твердости крупногабаритных изделий, которые в современных транспортных средствах изготавливаются с использованием вафельных конструкций. Данного недостатка лишен Метод Либа (HL) он также может быть применен для акрилатов с повышенной жесткостью, так как их модуль упругости позволяет оценивать отскок ударного тела. Твердость по шкале Либа (HL) коррелируется с показателями твердости по Роквеллу (HR), Бринеллю (HB), Виккерсу (HV), используя переводные таблицы или программные комплексы.

Поэтому метод Либа (HL) был принят в качестве основного, для проведения серии экспериментов по определению влияния конструктивного элемента типа вафельного поля, на твердость изделия изготовленного из полимерного материала.

Твердость определялась при помощи прибора ТЕМП-3 и экспериментальные исследования показали, что твердость готового изделия из фотополимера ROEHM R-50 с вафельной конструкцией с размерами ячеек 3,8×3,8 мм и толщиной стенки 1 мм составила HL = 641, что на 10,3 % выше аналогичного образца без вафельного поля HL = 581.

На практике прочностные характеристики для полимеров варьируются в более широких пределах, так что найденная твердость дает лишь приблизительную оценку, тем не менее, полученные данные показывают удовлетворительные результаты.

Разработанная технология изготовления ребристых ячеек позволила провести ее апробацию на изделиях с размерами вафельного поля 0,2×0,2 мм. Полученный образец представлен на рис. 7, а измерение его механических характеристик показали возросшую твердость до HL = 653, что на 12,3 % больше, чем у образца без вафельного поля.

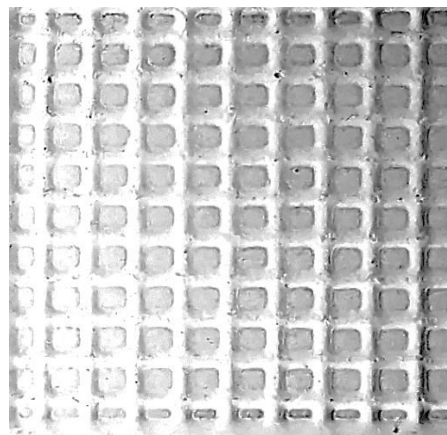


Рис. 7. Полученное изделие с вафельной конструкцией, размеры ячеек 0,2х0,2 мм

Перспективные возможности разработанной технология изготовления вафельной конструкции. Большой интерес в машиностроении вызывают изделия с применением сетчатых конструкций, состоящих из пересекающихся ребер жесткости, ребер направленного расположения, сотовых конструкций, что является альтернативой вафельным. Они могут иметь регулярные геометрические формы, такие как кубические, октаэдрические или гексаэдрические ячейки, или объединять несколько типов решеток с изменяющейся плотностью или жесткостью в зависимости от нагрузки. Легкие и прочные они хорошо амортизируют, и уже сейчас изделия с такими компонентами находят применение в ракетно- и самолетостроении, медицине при

изготовлении имплантатов и протезов, различных теплообменниках и др. Градиентные структуры идеально подходят для распределения нагрузок или поглощения энергии. Изготовление таких конструкций на изделиях на 10–15 % увеличивают их прочностные и на 5–10 % – массогабаритные характеристики [18–20].

Предлагаемая и апробированная технология выполнения вафельной конструкции на изделиях из полимерных композиционных материалов позволяет изготовить различные сетчатые конструкции. Тем не менее, реализация этих технологий является темой дальнейших исследований, хотя некоторые пробные результаты, доказывающие возможности разработанной авторами методики, представлены на рис. 8.

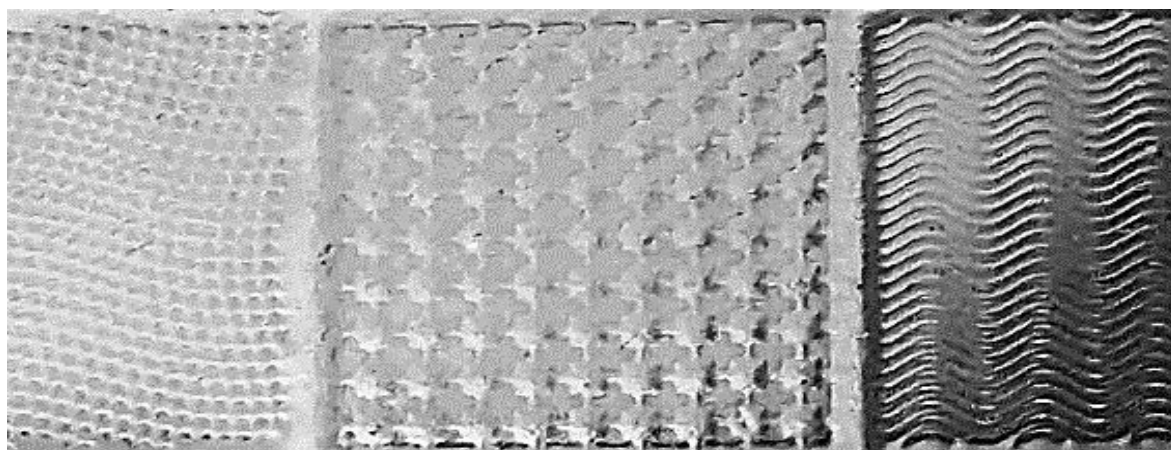


Рис. 8. Полученные изделия с сетчатыми конструкциями

Закключение. Таким образом, для сохранения точности геометрической формы ячеек вафельной структуры и обеспечения заданной массы детали, выполненной из полимерных композитных материалов целесообразно использовать фотолитографическую аддитивную технологию изготовления. В случае создания вафельной конструкции на цилиндрических изделиях или изделиях, имеющих радиусные поверхности, с целью упрощения технологии их можно изготавливать, используя разработанную авторами методику засвечивания за счет рассеивания луча засветки. Разработана методика определения необходимого угла рассеивания и фокусного расстояния рассеивающего устройства.

На примере используемого авторами фотокомпозиционного полимера РОЕИМ R-50 была проведена

апробация технологии изготовления вафельной конструкции на образцах размерами 30×30, позволяющей увеличить прочностные характеристики на 10,3 %.

Апробация разработанной технологии создания вафельной конструкции с микроячейками 0,2×0,2 мм показала возрастание твердости изделий на 12,3 % по сравнению с изделием без вафельного поля.

Определены перспективные возможности использования разработанной технологии получения вафельной конструкции на изделиях из композиционных фотополимерных материалов для изготовления сетчатых конструкций с целью улучшения массогабаритных и прочностных характеристик изделия.

Литература

1. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570С – материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия» // Космическая техника и технологии. 2014. № 4 (7). С. 62-67.
2. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения. М.: Изд-во Моск. гос. технич. ун-та, 2011. 431 с.
3. Sabir R., Khan A.A., Hasham H.J., Zeeshan Q. A Survey of Recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journ. of Space Technology. 2015. Vol. 5 (1). P. 103-115.
4. Department of transportation. Federal Aviation Administration. 14 CFR Airworthiness standards: Transport category air planes. 25–571 – Damage tolerance and fatigue evaluation of structure. Washington, USA, 2010. [Электронный ресурс]. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-11/25.571amdt54.pdf> (дата обращения 12.12.2024).
5. Нестеров В.Е. Космический ракетный комплекс «Ангара». История создания. В 2 т. Т. 2. М.: Ремарко, 2018. 539 с. ISBN 978-5-903615-90-2
6. Данченко В.Г., Шевцов Е.И., Гусев В.В. Способ оптимизации массы локально нагруженных отсеков ракет вафельной конструкции // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2017. № 2 (114). С. 131-136.
7. Faassen R.P.H., van de Wouw N., Oosterling J.A.J. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-

- speed milling // International Journ. of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43, Iss. 14. P. 1437-1446.
8. Батрутдинов Р.Г., Сысоев С.К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. Т. 1, № 7. С. 7-8.
 9. Михрютин В.В., Шерстобитов М.А. Методы механической обработки листовых обшивок планера самолетов // Вестн. Рыбинск. гос. авиационного технич. ун-та им. 2012. № 2 (23). С. 279-284.
 10. Panczuk R., Foissac P.Y. Machining process for panel and device for machining of at least one panel. Brazil patent BRPI0415768B1; filed October 22th, 2004; published July 4th, 2017.
 11. Bravo U., Altuzarra O., Lopez de Lacalle L.N. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // International Journ. of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 45, Iss. 15. P. 1669-1680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004
 12. Зайцев А.М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники: дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во "Открытый доступ", 2016. 171 с.
 13. Li J.W., Lee H.T., Tsai H.A., Suen M.C., Chiu C.W. Synthesis and properties of novel polyurethanes containing long-segment fluorinated chain extenders // Polymers. 2018. Vol. 10. P. 1292.
 14. Elbakyan L., Zaporotskova I. Composite nanomaterials based on polymethylmethacrylate doped with carbon nanotubes and nanoparticles: A Review // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 1242.
 15. Komarova T., Shipounova I., Kalinina N., Taliansky M. Application of chitosan and its derivatives against plant viruses // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 3122.
 16. Liebmann L. Enabling Alternating Phase Shifted Mask Designs for a Full Logic Gate Level // Journ. Microlithography Microfabrication and Microsystems. 2002. Vol. 2. P. 31-46.
 17. Филиппенко Н.Г., Чумбадзе Т.Т., Беломестных А.А., Пискажова Т.В. Управление технологическими процессами фотополимеризации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 3 (71). С. 19-24. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71)
 18. Васильев В.В., Барынин В.А., Разин А.Ф., Петроковский С.А., Халиманович В.И. Анизотропные композитные сетчатые конструкции – разработка и приложение к космической технике // Композиты и наноструктуры. 2009. № 3. С. 38-50.
 19. Васильев В. В., Разин А. Ф. Перспективы применения сетчатых композитных конструкций в гражданской авиации // Полет. 2016. № 11–12. С. 3-12.
 20. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. ASTM Standard D7136/D7136M-07. [Электронный ресурс]. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/90640/7c541e9793344ab5a5d6702ed7bb5622/ASTM-D7136-D7136M-15.pdf> (дата обращения 11.10.2024).
 4. Department of transportation. Federal Aviation Administration. 14 CFR Airworthiness standards: Transport category airplanes. 25–571 – Damage tolerance and fatigue evaluation of structure. Washington, USA, 2010. [Электронный ресурс]. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-11/25.571amdt54.pdf> (дата обращения 12.12.2024).
 5. Nesterov V.E. Space rocket complex “Anga-ra”. History of creation. In 2 vol. Vol. 2. Moscow: Remarco, 2018. 539 p. ISBN 978-5-90-903615-90-2
 6. Danchenko V.G., Shevtsov E.I., Gusev V.V. Method of the mass optimization of the locally loaded compartments of the waffle-design rockets // Space Engineering. Rocket armament. 2017. № 2 (114). P. 131-136.
 7. Faassen R.P.H., van de Wouw N., Oosterling J.A.J. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling // International Journ. of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43, Iss. 14. P. 1437-1446.
 8. Batrutdinov R.G., Sysoev S.K. Technology of wafer background manufacturing in aircraft shells // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2011. Vol. 1, № 7. P. 7-8.
 9. Mikhryutin V.V., Sherstobitov M.A. Methods of the mechanical processing of the airplane airframe sheet skins (in Russian) // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technical Univ. 2012. № 2 (23). P. 279-284.
 10. Panczuk R., Foissac P.Y. Machining process for panel and device for machining of at least one panel. Brazil patent BRPI0415768B1; filed October 22th, 2004; published July 4th, 2017.
 11. Bravo U., Altuzarra O., Lopez de Lacalle L.N. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // International Journ. of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 45, Iss. 15. P. 1669-1680. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.004
 12. Zaitsev A.M. Development of directions for increasing the efficiency of technological preparation of production of parts and assemblies of rocket-space technology: dissertation ... candidate of technical sciences. Moscow: Publishing house, 2016. 171 p.
 13. Li J.W., Lee H.T., Tsai H.A., Suen M.C., Chiu C.W. Synthesis and properties of novel polyurethanes containing long-segment fluorinated chain extenders // Polymers. 2018. Vol. 10. P. 1292.
 14. Elbakyan L., Zaporotskova I. Composite nanomaterials based on polymethylmethacrylate doped with carbon nanotubes and nanoparticles: A Review // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 1242.
 15. Komarova T., Shipounova I., Kalinina N., Taliansky M. Application of chitosan and its derivatives against plant viruses // Polymers. 2024. Vol. 16. P. 3122.
 16. Liebmann L. Enabling Alternating Phase Shifted Mask Designs for a Full Logic Gate Level // Journ. Microlithography Microfabrication and Microsystems. 2002. Vol. 2 P. 31-46.
 17. Filippenko N.G., Chumbadze T.T., Belomestnykh A.A., Piskazhova T.V. Control of technological processes of photopolymerization // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2021. № 3 (71). P. 19-24. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.3(71)
 18. Vasiliev V.V., Barynin V.A., Razin A.F., Petrokovsky S.A., Halimanovich V.I. Anisogrid composite mesh structures - development and application to space technology // Composites and nanostructures. 2009. № 3. P. 38-50.
 19. Vasiliev V. V., Razin A. F. Prospects of application of mesh composite structures in civil aviation // Flight. 2016. № 11-12. P. 3-12.
 20. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event. ASTM Standard D7136/D7136M-07. [Электронный ресурс]. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/90640/7c541e9793344ab5a5d6702ed7bb5622/ASTM-D7136-D7136M-15.pdf> (дата обращения 11.10.2024).

References

1. Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskiy A.G. Alloy 1570C – material for hermetic structures of advanced reusable products of RSC Energia // Space Engineering and Technology. 2014. № 4 (7). P. 62-67.
2. Komkov M.A., Tarasov V.A. Winding technology of the composite structures of missiles and means of destruction. Moscow: Publishing house of Moscow State Technical University, 2011. 431 p.
3. Sabir R., Khan A.A., Hasham H.J., Zeeshan Q. A Survey of Recent Developments in Optimization of Iso-Grid Cylinders // Journ. of Space Technology. 2015. Vol. 5 (1). P. 103-115.