

**ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ
В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ*****Ю.Н. Хохлов**

yurijhohlov1998@mail.ru

SPIN-код: 1221-9816

М.В. Ключников

mikeissr@mail.ru

SPIN-код: 8580-7619

М.А. Прохорова

mary.prokhorova.bmstu@gmail.com

SPIN-код: 9107-0563

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Рассмотрены особенности получения отверстий в композиционных материалах различными современными методами, применяющимися в промышленном производстве, в том числе и для изготовления изделий авиационной и ракетной техники. Выполнено сравнение применяемых на данный момент времени методов: механической обработки сверлением, лазерного метода, ультразвукового и ультразвукового. Основное внимание уделено формулировке перспективных направлений развития каждого из этих методов формоизменения. Приведен сравнительный анализ достоинств и недостатков, показаны перспективы развития. В качестве одного из альтернативных имеющихся предложен новый метод — прокалывание полуконвергентного полимерного композиционного материала, армированного стекло- или углепластиковыми волокнами. Его отличительной особенностью является сохранение структуры материала изделия или наличие незначительных ранее известных повреждений композиционных материалов.

Ключевые слова

Формование отверстий, метод прокалывания, полимерный композиционный материал, лазерная резка, ультразвуковая обработка, ультразвуковые технологии, механическое формообразование

Поступила в редакцию 01.12.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Применение композиционных материалов (КМ) в авиа- и ракетно-космической промышленности уже давно заняло лидирующую позицию по сравнению с применением других однокомпонентных материалов [1]. Например, в Boeing 787 DreamLiner из углеродсодержащих КМ изготовлено более 50 % конструкции фюзеляжа, что, в свою очередь, способствовало существенному уменьшению массы самолета при одновременном упрочнении его конструкции по сравнению с лайнерами, фюзеляж которых выполнен полностью из алюминия [2].

* Исследования выполнялись в рамках гранта от фонда содействия инновациям по программе УМНИК-18 (в) в соответствии с договором №14727ГУ/2019.

С появлением КМ ученым и инженерам пришлось пересмотреть свой подход к традиционным технологиям формообразования композиционных изделий. Ведь по сравнению с однокомпонентными традиционными материалами (например, алюминием) КМ обладают внутренней армирующей структурой, нарушение которой приводит к резкому снижению прочностных свойств в зоне механической обработки [3, 4].

Получение отверстий в изделиях из КМ обусловлено потребностью последующей сборки в какой-либо узел или агрегат. К традиционным крепежным элементам относятся болты, заклепки, шпильки, которые до сих пор широко применяются в машиностроении в целом. Но, прежде чем приступить к крепежным операциям, необходимо получить отверстия в изделиях из КМ. В число применяемых методов формообразования КМ входят: обработка лазером, ультразвуковые методы, ультразвуковые технологии и механическая обработка [5, 6]. Также отметим, что в рамках некоторых конкретно решаемых задач в качестве местного упрочнения применяют дополнительное армирование металлическими пластинами зоны будущего формования отверстия. Помимо этого применительно к методу намотки можно отметить, что если заранее известны размеры отверстия, то его можно учесть при создании специальной оправки, на которую будет осуществляться намотка. В результате получится высококачественное изделие нужной конфигурации с уже отформованным отверстием без нарушения структуры армирующей ленты.

Лазерные методы обработки композиционных материалов. Важно отметить, что иногда применяются лазерные методы обработки КМ на основе углеродной матрицы и углеродного наполнителя (УУКМ), которые благодаря своей повышенной химической стойкости нашли свое применение в нефтяной промышленности [7]. Механизм лазерной обработки (раскроя) заключается в испарении материала в зоне термического влияния лазера. Главными недостатками данного метода является появление термических напряжений из-за обширной зоны термического влияния, а также очень длительное время обработки. Например, для лазерной обработки КМ на основе углерода со скоростью 5 мм/с потребуется 150 Вт мощности излучения на каждый миллиметр толщины КМ (при диаметре сфокусированного пучка лазера 0,4...0,5 мм) [8]. В результате полученный рез обладает высоким качеством, так как выделение пируглерода во время лазерной обработки способствует сглаживанию кромок реза и препятствует их махрению. Однако данный метод едва можно назвать эффективным из-за продолжительности обработки и ограничений по толщине обрабатываемого материала.

Ультразвуковые методы обработки композиционных материалов. При необходимости точной обработки изделий сложной формы из труднообрабатываемых КМ применяют ультразвуковой метод формообразования, во время которого режущему инструменту сообщаются колебания, в результате чего материал удаляется с обрабатываемой поверхности.

Ультразвуковая обработка (УЗО) — процесс обработки материала лезвийным инструментом, колеблющимся с малой амплитудой, но с очень высокой частотой в среде, содержащей абразивный порошок. В основе УЗО заложен принцип копирования формы лезвийного инструмента. От фракции зерен аб-

разивного порошка зависит качество обработанной поверхности, ее шероховатость. Наиболее распространенные размеры частиц лежат в интервале 100...1000 мкм, их зернистость установлена с помощью ГОСТ 52381–2005 [9].

По данным фирмы производителей центров ULTRASONIC, за 2013 г. благодаря наложению колебаний на вращающийся режущий инструмент удалось добиться снижения силы резания почти в 2 раза по сравнению с традиционными методами лезвийной обработки [10]. Тем не менее метод УЗО не позволяет полностью избавиться от заусенцев в зоне обрабатываемой поверхности, поскольку в его основе лежит воздействие лезвийным инструментом.

Ультразвуковые технологии обработки композиционных материалов.

Под ультразвуковыми технологиями обработки (УСТО) материалов будем понимать технологии гидрорезания сверхзвуковой, содержащей абразив [11–13]. Данный метод является одним из наиболее эффективных методов обработки деталей ракетно-космической техники. УСТО позволяет получить качественный рез и обладает высокой производительностью. А благодаря варьированию параметров процесса ультразвуковой обработки (например, изменением типа или фракции абразивного порошка или угла наклона струеформирующей головки) можно добиться повышения скорости резания при сохранении или даже повышения качества реза обрабатываемого материала [14].

УСТО хорошо зарекомендовали себя при формообразовании труднообрабатываемых материалов, сложнопрофильных деталей, сотовых панелей и многого другого [15]. Данный метод является одним из перспективных методов обработки КМ.

Механические методы обработки композиционных материалов. Анализ литературы показал, что наиболее распространенным методом формообразования изделий из КМ на данный момент является обработка вращающимся лезвийным инструментом, в ходе которой происходит перерезание структуры КМ. К таким методам формообразования относятся сверление, точение, фрезерование, шлифование и др.

Сверление отверстий уже в отвержденных КМ на основе тканевого наполнителя приводит к дефектам, не только затрудняющим последующую сборку изделий, но и понижающим прочностные характеристики соединения в целом. К данным дефектам относят махровость поверхности, наличие заусенцев, перерезание нитей, растрескивание связующего, расслоение КМ и др. [16, 17].

Многие фирмы — производители режущих инструментов пытаются свести к минимуму наличие или проявление вышеперечисленных дефектов. Среди них лидирующие позиции занимают Sandvik (Швеция), Hoffmann (Германия), Karnasch (Германия), SECO (Швеция), TUNIT (Италия), Kyocera (Япония), A2C (Франция). Лидирующие позиции фирм производителей режущих инструментов занимают Sandvik и Karnasch, ежегодно выпускающие для потребителей целые серии каталогов режущих инструментов. Обилие различных инструментов обусловлено стремлением создавать наиболее оптимальную форму инструмента для каждого вида КМ. При этом нужно понимать, что как бы инженеры не модифицировали форму сверла, его режущие кромки всегда будут перерезать нити армирующего наполнителя КМ, понижая прочность материала в зоне сверления.

Заключение. В результате обзора методов получения отверстий в КМ можно сделать вывод о том, что ни один из рассмотренных методов не обеспечивает сохранение структуры армирующего наполнителя, целостность которой влияет на физико-механические свойства КМ. К сожалению, все применяемые методы обладают недостатками, отрицательно влияющими на прочностные свойства обрабатываемой поверхности. Для удобства сравнения рассматриваемых методов была создана таблица, в которой описаны преимущества и недостатки каждого метода (механическая обработка, лазерная обработка, ультразвуковая обработка и ультразвуковые технологии). На основе существующих недостатков были сформулированы возможные перспективные направления развития каждого представленного метода (см. таблицу).

Обрабатываемость композиционных материалов различными методами

| Вид формообразования | Достоинства | Недостатки | Перспективы развития |
|--------------------------|--|---|---|
| Механическая обработка | <ul style="list-style-type: none"> • Высокая точность • Низкая шероховатость (не для всех материалов) • Высокая технологичность • Наличие богатой исторической базы практического применения | <ul style="list-style-type: none"> • Низкая стойкость режущего инструмента • Повышенная температура в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью | Совершенствование инструмента с целью увеличения срока службы |
| Лазерная обработка | <ul style="list-style-type: none"> • Высокая точность • Отсутствие деформаций • Отсутствие габаритных ограничений для деталей или заготовок | <ul style="list-style-type: none"> • Повышенная температура в зоне реза • Выделение нежелательных газов • Оплавление краев резания • Низкая производительность • Высокая энергозатратность | Повышение мощности лазера для обеспечения высокой производительности и чистоты реза |
| Ультразвуковая обработка | <ul style="list-style-type: none"> • Высокая точность • Низкая шероховатость • Отсутствие или минимальное расслоение материала | Низкие производительность и стойкость режущего инструмента | Повышение стойкости инструмента, возможность дооснащения обычных режущих станков ультразвуковым оборудованием |

| Вид формообразования | Достоинства | Недостатки | Перспективы развития |
|---|--|---|--|
| Ультратруйные технологии | <ul style="list-style-type: none"> • Высокая точность • Высокая производительность • Отсутствие габаритных ограничений для деталей или заготовок • Высокая эффективность • Низкая энергозатратность • Отсутствие термического воздействия в зоне реза (максимальная температура может достигать 70°) | <ul style="list-style-type: none"> • Низкая производительность • Ограничения по толщине обрабатываемого материала | Совершенствование технологического оборудования, увеличение максимального давления струи |
| Метод прокалывания полуотвержденного КМ | <ul style="list-style-type: none"> • Сохранение структуры КМ • Увеличение прочностных свойств в зоне формируемого отверстия | <ul style="list-style-type: none"> • Отсутствие разработок для внедрения в крупномасштабное производство • Малоизученность физических процессов | Разработка технологической оснастки для внедрения в производство |

Возможно, решение проблемы сохранения структуры лежит не в совершенствовании уже существующих методов формообразования КМ, а в разработке и внедрении нового инновационного метода. Одним из них может оказаться метод прокола полуотвержденного КМ на основе тканевого наполнителя. Как показали лабораторные исследования, проколотые отверстия обладают определенными преимуществами по сравнению с просверленными [18].

Во-первых, при прокалывании полуотвержденных КМ нити армирующей ткани не перерезаются, а развигаются и скапливаются в зоне формируемого отверстия. Испытания на смятие проколотых отверстий показали увеличение прочности на 60 % по сравнению с просверленными отверстиями [19]. Более того, экспериментально было доказано, что для ленты ЭЛУР-0.08ПА ГОСТ 28006–88, пропитанной связующим ЭНФБ ТУ 1-596-36-2005, при испытании на растяжение проколотые отверстия обладают более высокой прочностью (примерно на 30 %) по сравнению с просверленными отверстиями [20].

Несмотря на свои существенные преимущества, метод прокалывания нуждается в серьезных доработках до внедрения в промышленное производство. Из-за отсутствия технологической базы необходимо глубокое изучение процессов, происходящих в КМ во время формообразования, экспериментальные исследования, разработка специального инструмента, а также технологической оснастки. Однако есть основания надеяться, что возможность получить новый промышленный метод получения отверстий в КМ, одновременно сохранив бездефектной структуру материала, все же существует.

Литература

- [1] Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра. *Металлы Евразии*, 2015, № 1, с. 36–39.
- [2] Авиалайнер Boeing 787: Dreamliner. *Популярная механика*, 2006, № 10. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/5711-avialayner-boeing-787-dreamliner/>
- [3] Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № 5, с. 186–194.
- [4] Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механической обработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, № 9. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>
- [5] Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1, с. 3–33.
- [6] Zheng K., Politis D.J., Wang L., et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 55–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006>
- [7] Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. Минск, Белорусская наука, 2008.
- [8] Кузнецов С.И., Петров А.Л. Применение лазерного излучения для модификации поверхности и раскроя углеродных композиционных материалов и углеродных тканей. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2003, т. 5, № 1, с. 46–54.
- [9] Chen Y., Liang Y., Xu J., et al. Ultrasonic vibration assisted grinding of CFRP composites: Effect of fiber orientation and vibration velocity on grinding forces and surface quality. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 189–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.08.003>
- [10] Моргунов Ю.А., Опальницкий А.И., Перепечкин А.А. Современное состояние и перспективы применения в машиностроении ультразвуковой размерной обработки изделий. *Известия МГТУ МАМИ*, 2012, № 2(14), с. 140–144.
- [11] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультраструйной диагностики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-11-421>
- [12] Галиновский А.Л. Анализ инновационного потенциала ультраструйных технологий в оборонных отраслях промышленности. *Оборонная техника*, 2008, № 6, с. 54–59.
- [13] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3(15). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-636>
- [14] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Хафизов М.В. и др. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 1, с. 71–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2016-1-71-77>
- [15] Илюхина А.А., Колпаков В.И., Галиновский А.Л. и др. Особенности процесса гидроабразивной резки сотовых панелей космических аппаратов. *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2018, № 4, с. 101–107.
- [16] Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, № 9. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>

- [17] Комков М.А., Колганов А.В. Формование отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного материала. *Мат. 2-й междунар. науч. конф. Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003, с. 9–13.
- [18] Федотов Д.А., Скворцов К.Г. Исследования прочности отверстий, полученных методом прокола. *Труды МАИ*, 2018, № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90152&eng=N>
- [19] Комков М.А., Колганов А.В. Моделирование процесса формования отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного полимерно-волоконистого материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 3, с. 33–47.
- [20] Болотин Ю.З., Васильева Т.В., Василенко Е.В. Сравнение работоспособности конструкций из композиционных материалов с отверстиями, полученными сверлением и прокалыванием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, № 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-3-1332>

Хохлов Юрий Николаевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Клюшников Максим Вячеславович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Прохорова Мария Алексеевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Васильева Татьяна Владимировна, старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Хохлов Ю.Н., Клюшников М.В., Прохорова М.А. Литературный обзор способов получения отверстий в композиционных материалах. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 01(54). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-01-664>

LITERATURE REVIEW OF METHODS FOR OBTAINING HOLES*

Yu.N. Khokhlov

yurijhohlov1998@mail.ru

SPIN-code: 1221-9816

M.V. Klyushnikov

mikeissr@mail.ru

SPIN-code: 8580-7619

M.A. Prokhorova

mary.prokhorova.bmstu@gmail.com

SPIN-code: 9107-0563

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper is devoted to the features of making holes in composite materials by various modern methods used in industrial production, including aviation and rocket technology. A comparison is made of the methods used now: mechanical drilling, laser method, ultrasonic and ultrajet. The main attention is paid to the formulation of promising directions for the development of each of these methods of shaping. A comparative analysis of the advantages and disadvantages is given, development prospects are shown. As an alternative to the existing ones, the authors propose a new method — piercing of a semi-cured polymer composite material reinforced with glass or carbon plastic fibers. Its distinctive feature is the preservation of the structure of the product material or the presence of minor previously known damage to composite materials.

Keywords

Hole forming, piercing method, polymer composite material, laser cutting, ultrasonic processing, ultrajet technology, mechanical shaping

Received 01.12.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii* [Eurasian Metals], 2015, no. 1, pp. 36–39 (in Russ.).
- [2] Boeing 787: Dreamliner airliner. *Populyarnaya mekhanika*, 2006, no. 10. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/5711-avialayner-boeing-787-dreamliner/> (in Russ.).
- [3] Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. 5, pp. 186–194 (in Russ.).
- [4] Raskutin A.E., Khrul'kov A.V., Girsh R.I. Technological features of composite materials machining in manufacturing details of structures (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 9. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12> (in Russ.).
- [5] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of “strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1, pp. 3–33 (in Russ.).

* The research was carried out within the framework of a grant from the Innovation Promotion Fund under the UMNK-18 (v) program in accordance with contract No. 14727GU/2019

- [6] Zheng K., Politis D.J., Wang L., et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 55–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006>
- [7] Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Lazernye tekhnologii v mashinostroenii i metalloobrabotke* [Laser technologies in machine building and metal treatment]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2008 (in Russ.).
- [8] Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Surface modification and cutting of carbon composites and carbon fabrics under the action of laser radiation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2003, vol. 5, no. 1, pp. 46–54 (in Russ.).
- [9] Chen Y., Liang Y., Xu J., et al. Ultrasonic vibration assisted grinding of CFRP composites: Effect of fiber orientation and vibration velocity on grinding forces and surface quality. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 189–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.08.003>
- [10] Morgunov Yu.A., Opal'nitskiy A.I., Perepechkin A.A. The current state and prospects of ultrasonic dimensional processing in mechanical engineering. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2012, no. 2(14), pp. 140–144 (in Russ.).
- [11] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. Physical processing features analysis of ultrajet diagnostics. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-11-421> (in Russ.).
- [12] Galinovskiy A.L. Analysis of ultrajet technology innovative potential for defense industry. *Oboronnaya tekhnika*, 2008, no. 6, pp. 54–59 (in Russ.).
- [13] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3(15). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-636> (in Russ.).
- [14] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Khafizov M.V., et al. Increasing the efficiency of hydroabrasive cutting through the choice of rational cutting modes by acoustic emission method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2016, no. 1, pp. 71–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2016-1-71-77> (in Russ.).
- [15] Lyukhina A.A., Kolpakov V.I., Galinovskiy A.L., et al. The features of hydroabrasive cutting of honeycomb panels of space vehicles. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*, 2018, no. 4, pp. 101–107 (in Russ.). (Eng. version: *Moscow Univ. Phys.*, 2018, vol. 73, no. 4, pp. 441–446. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0027134918040069>)
- [16] Raskutin A.E., Khrul'kov A.V., Girsh R.I. Technological features of composite materials machining in manufacturing details of structures (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12> (in Russ.).
- [17] Komkov M.A., Kolganov A.V. [Holes formation in composite constructions by puncturing uncured materials]. *Mat. 2-y mezhd. nauch. konf. Raketno-kosmicheskaya tekhnika: fundamental'nye i prikladnye problemy* [Proc. 2nd Int. Sci. Conf. Rocket-Space Technique: Fundamental and Applied Problems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003, pp. 9–13 (in Russ.).
- [18] Fedotov D.A., Skvortsov K.G. Investigation of the strength of puncture holes. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90152&eng=N> (in Russ.).

- [19] Komkov M.A., Kolganov A.V. Modeling of process of originating holes in composite constructions by method of puncturing non-solidified polymer fibrous material. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2007, no. 3, pp. 33–47 (in Russ.).
- [20] Bolotin Yu.Z., Vasil'yeva T.V., Vasilenko E.V. Comparison of working capacity of designs from composite materials with holes executed by puncturing and drilling. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2014, no. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2014-3-1332> (in Russ.).

Khokhlov Yu.N. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Klyushnikov M.V. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Prokhorova M.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Vasilyeva T.V., Senior Lecturer, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Khokhlov Yu.N., Klyushnikov M.V., Prokhorova M.A. Literature review of methods for obtaining holes. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 01(54). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-01-664.html> (in Russ.).