

## **Сравнение работоспособности конструкций из композиционных материалов с отверстиями, полученными сверлением и прокалыванием**

© Ю.З. Болотин, Т.В. Васильева, Е.В. Василенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Показаны перспективы применения композиционных материалов. Описана технология сборки ответственных и высоконагруженных элементов конструкций. Указаны недостатки существующей технологии. Приведен обзор современных инструментов для обработки композиционных материалов, которые снижают концентрацию напряжений около просверленных отверстий. Изложена методика изменения технологии сборки и приведены результаты экспериментов. Показано, что на препреге получены характеристики прочности, близкие к характеристикам, полученным на неотвержденном композиционном материале.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, наполнитель, матрица, связующее, препрег, отверждение, сверление, прокалывание.

**Введение.** В настоящее время одним из видов материалов, используемых в конструкциях современных летательных аппаратов, являются материалы на основе углеродных, борных, органических и стеклянных волокон в сочетании с полимерными, металлическими, углеродными, керамическими и другими видами матриц (связующих). Такой материал называют композиционным. Каждый его компонент имеет свои характеристики, а весь композит в целом приобретает новые свойства, отличные от свойств составляющих его компонентов, которые позволяют обеспечить минимальную массу, максимальную жесткость и прочность узлов, максимальный ресурс работы конструкций в зависимости от условий эксплуатации, высокую надежность. Благодаря своим уникальным возможностям композиционные материалы широко используются в производстве аэрокосмической техники, оборудования различного назначения, при изготовлении автомобилей, бытовых и спортивных товаров.

**Общие понятия и определения.** *Композиционный материал* (КМ) — многофазный однородный анизотропный материал регулярной структуры с четко выраженной границей раздела фаз.

*Наполнитель* — армирующий элемент, составная часть КМ, которая может быть нитяной, жгутовой, проволочной, ленточной или тканевой структуры с известными физико-механическими характеристиками.

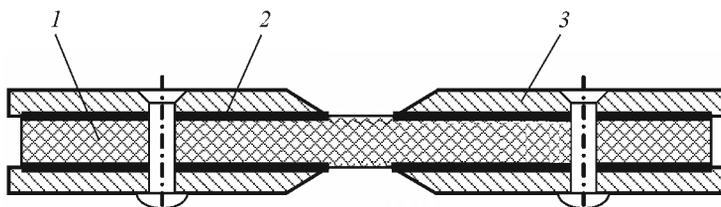
*Матрица* — составная часть КМ, обеспечивающая его монолитность и совместную работу всех моноволокон наполнителя.

*Связующее* — смола, раствор, газ, порошок, расплав, образующие матрицу в процессе изготовления композита.

*Препрег* — полуфабрикат, прошедший предварительную термообработку и представляющий собой волокнистый наполнитель, пропитанный связующим в определенном весовом соотношении. Окончательное отверждение препрега выполняется при дальнейших технологических операциях.

*Отверждение* — процесс затвердевания связующего при изготовлении композита в результате реакций полимеризации, поликонденсации, кристаллизации, а также в результате перехода из жидкой фазы в твердую.

**Сборка высоконагруженных элементов конструкций из КМ.** При создании изделий из КМ возникает необходимость их сборки. При сборке высоконагруженных и тонкостенных элементов конструкций обычно применяют клееболтовые, клеештифтовые и клееклепаные (рис. 1) соединения.



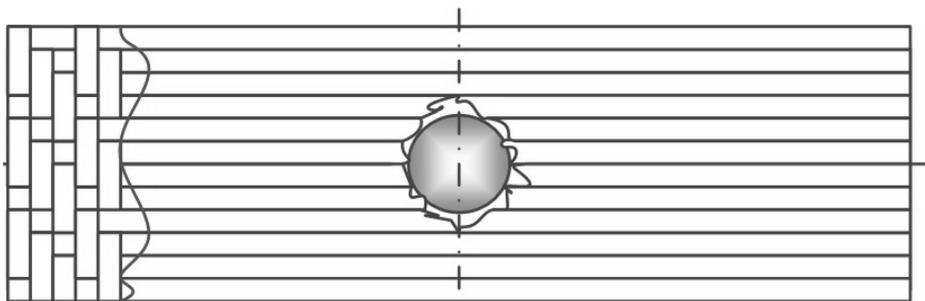
**Рис. 1.** Клееклепанное соединение:

1 — композиционный материал; 2 — клей; 3 — металл

В этих соединениях силовым элементом является металл. Технология их сборки состоит из следующих операций:

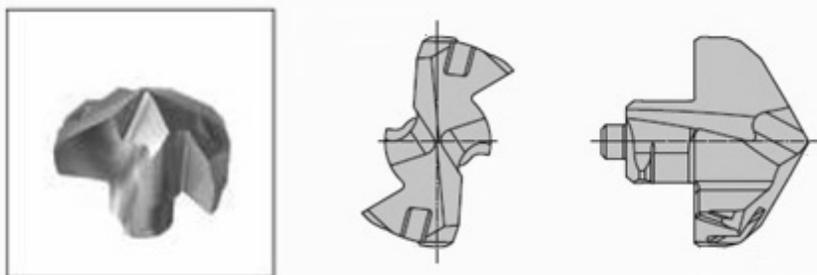
- 1) нанесение жидкого подслоя эластичного клея на все соединяемые поверхности;
- 2) сушка при комнатной температуре;
- 3) нанесение основного слоя клея на поверхности, соединение поверхностей, отверждение клеевого слоя;
- 4) совместное сверление отверстий в металле и КМ.

**Современный режущий инструмент, применяемый при сверлении КМ.** Реализация клеемеханических соединений связана со сверлением отверстий в уже отвержденных композитных конструкциях, что приводит к перерезанию нитей и потере прочности, растрескиванию связующего и расслоению КМ по стенкам отверстий [1, 2] и другим дефектам (рис. 2). В настоящее время множество отечественных и зарубежных компаний (ISCAR, SANDVIK и др.) решают проблему устранения этих недостатков.



**Рис. 2.** Структура волокна после сверления

Крупнейшая металлообрабатывающая компания ISCAR в группе IMC (принадлежит Berkshire Hathaway) производит уникальные инновационные режущие инструменты для различных методов обработки. Компания выпускает сверла со взаимозаменяемыми головками на базе изделий SumoCham. Новые головки сверл серии ICF (рис. 3) специально разработаны для обработки КМ. Быстрая замена головок и высокая скорость позиционирования обеспечивают сокращение времени операции. Относительно небольшие вставляемые головки сверл с алмазным покрытием гораздо выгоднее, чем цельные карбидные сверла, к тому же их легче складировать. Серия SumoCham используется для обработки отверстий диаметром 6,35...12,7 мм в КМ [3].

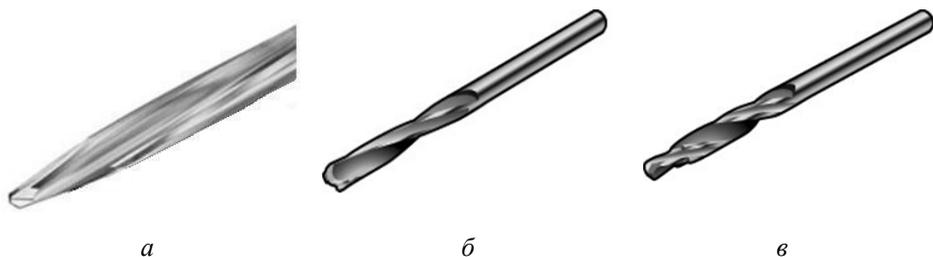


**Рис. 3.** Сверло ICF-2M-CFRP

Компания SANDVIK разработала линейку инструментов, оптимизированных для обработки углепластика и пакета «углепластик – металл». Геометрия инструмента позволяет обеспечить небольшие силы резания, снижает риск отслаивания, перерезания нитей материала и образования заусенцев [4].

Сверло CoroDrill 452.1...С для обработки композитов (рис. 4, а) правого исполнения с левосторонней винтовой канавкой уменьшает осевое усилие для повышения качества отверстия. Конструкция сверла

обеспечивает плавный выход его из углепластика. Оно используется с кондукторной втулкой для обработки отверстий с допусками до IT 0,05 мм [4].



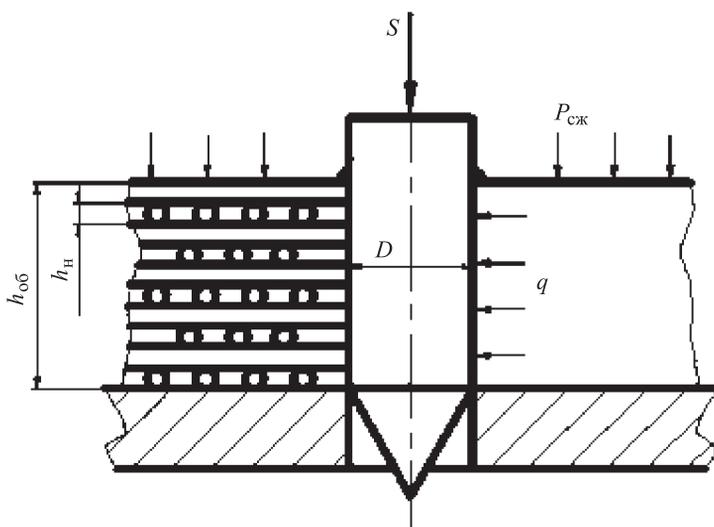
**Рис. 4.** Сверло CoroDrill 452.1...С (а), CoroDrill 452.1...СМ (б) и CoroDrill 452.4...СМ (в)

Самоцентрирующееся сверло CoroDrill 452.1...СМ для обработки пакетов «композит – металл» (рис. 4, б) предназначено для сверления отверстий в сплошном материале [4].

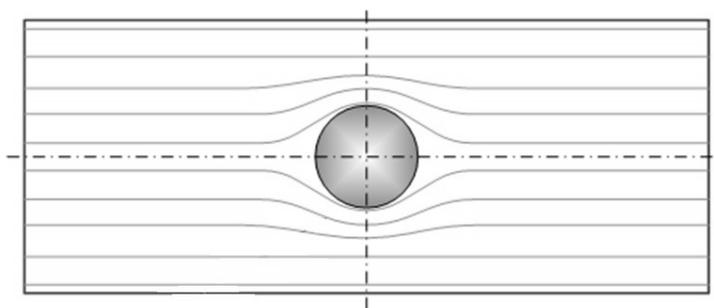
Сверло CoroDrill 452.4...СМ с направляющей применяется при обработке пакетов «композит – металл» (рис. 4, в) и предназначено для предварительно просверленных отверстий и получения отверстий высокого качества. При сверлении требуются минимальные усилия резания. Используется с направляющей втулкой для обработки отверстий с минимальной разностью диаметров между пакетами материала [4]. При обработке отверстий в высокополимерных материалах с повышенным риском расслоения и образования сколов сверло может быть оптимизировано за счет геометрии, что позволит обеспечить повышение качества отверстия на входе и на выходе в материалах, армированных волокном с высоким содержанием углерода [4].

**Альтернативный метод формования отверстий в КМ.** Альтернативой сверлению отверстий в полимерно-волокнутом отвержденном (сухом) материале является метод прокалывания в еще неотвержденном (мокрое) материале (рис. 5).

В процессе получения отверстий с помощью индентора (заостренного стержня) происходит раздвигание, а не перерезание нитей, что приводит к увеличению статической прочности композита. Кроме того, за счет уплотнения волокон стенки отверстия увеличивается прочность на смятие между крепежным элементом стержня и стенкой отверстия, т. е. для полимерно-волокнутого материала с проколотыми отверстиями значение допустимых напряжений  $\sigma_{доп}$  будет выше, чем для материалов с просверленными отверстиями, так как исходный материал на краю отверстия будет усилен деформированными и искривленными нитями, которые сдвинулись от центра при формировании отверстия.



а



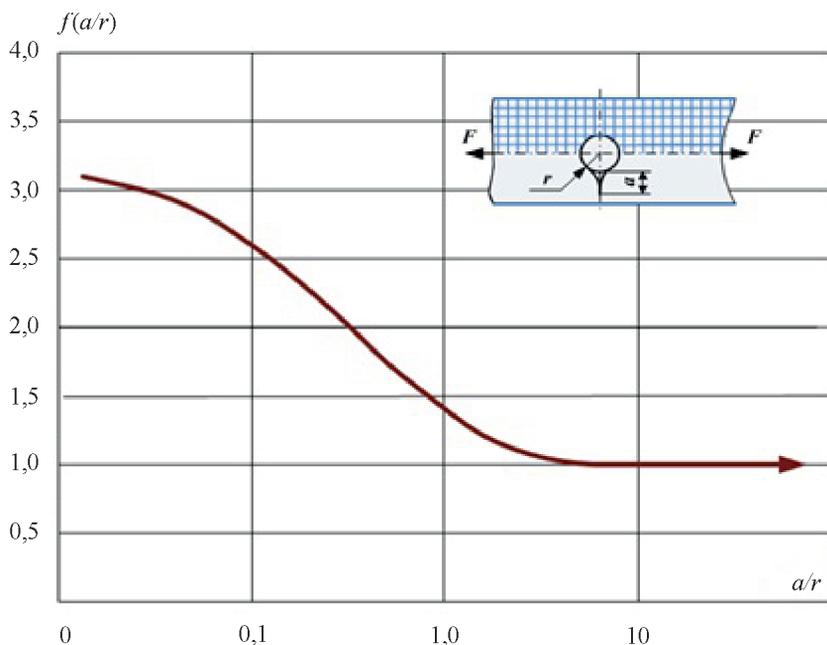
б

**Рис. 5.** Метод прокалывания (а) и структура волокна после прокалывания (б):  $P_{сж}$  — внешнее обжатие;  $q$  — внутрислойное давление;  $D$  — диаметр индентора;  $h_н$  — толщина нитей;  $h_{об}$  — толщина оболочки (материала);  $S$  — подача

Потерю статической прочности отвержденного КМ в области отверстий можно определить из графической зависимости [1, 2] (рис. 6):

$$\sigma_{доп} = \sigma_B / f(a/r),$$

где  $\sigma_{доп}$  — уровень допустимых напряжений;  $\sigma_B$  — предел прочности (напряжения) материала при растяжении;  $f(a/r)$  — коэффициент концентрации напряжений, полученный опытным путем при одноосном растяжении плоских пластин с углами укладки волокон  $0/90^\circ$ ;  $a = 0,75 \dots 1,25$  мм — размер области с интенсивным высвобождением энергии около отверстия;  $r$  — радиус отверстия.



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $f(a/r)$  от относительного размера области интенсивного высвобождения энергии  $a/r$  в отвержденном материале ( $F$  — усилие растяжения)

При использовании в экспериментальном расчете коэффициента концентрации напряжений для  $1,25 \leq r \leq 7,5$  мм значение  $a$  равно 1,0 мм.

**План проведения эксперимента.** В работе [5] был рассмотрен метод прокалывания на неотвержденном материале. Цель эксперимента заключалась в сравнении работоспособности образцов из препрега с данными работ [1, 2, 5].

Для проведения экспериментов использовался препрег: наполнитель — лента ЭЛУР-0,08ПА ГОСТ 28006–88; связующее — эпоксидная смола ЭНФБ ТУ 1-596-36–2005 (концентрация 51 %). Толщина образца 0,09 мм, ширина 20 мм.

Испытывались следующие типы образцов:

- по 10 образцов с отверстиями, образованными сверлением, диаметрами 2, 4 и 6 мм;
- по 10 образцов с отверстиями, образованными прокалыванием, диаметрами 2, 4 и 6 мм.

В процессе проведения эксперимента часть образцов в состоянии препрега прокалывалась инденторами с последующим их отверждением (рис. 7, а); часть образцов в отвержденном состоянии просверливалась (рис. 7, б).

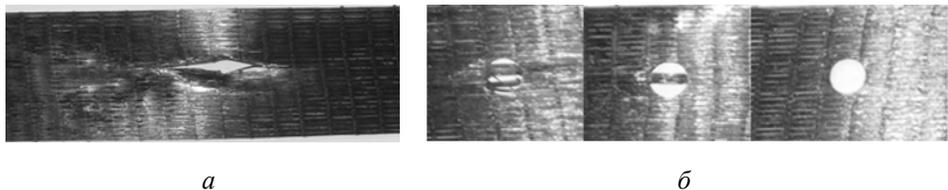
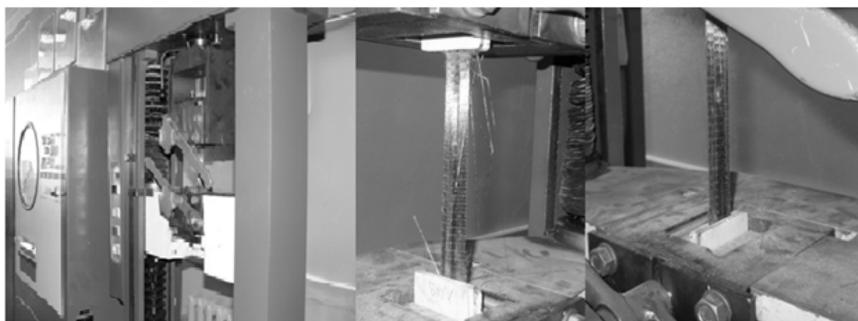
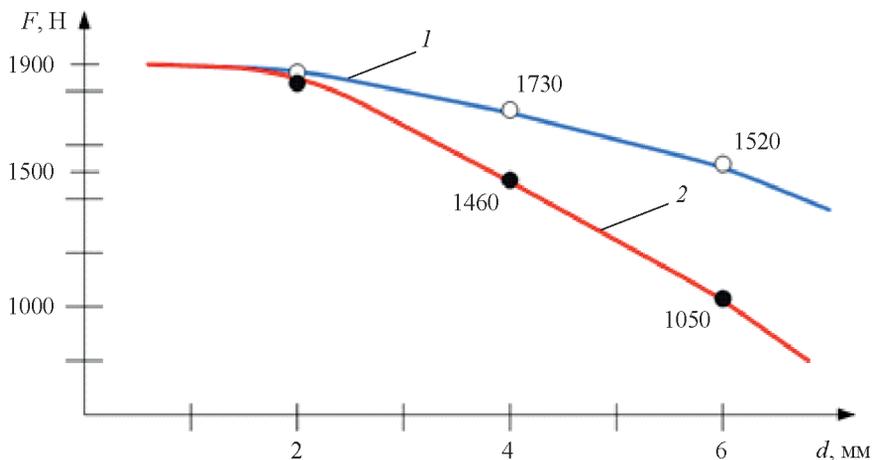


Рис. 7. Отверстия, полученные методом прокалывания (а) и сверления (б)

После этого образцы подвергались растяжению на разрывной машине (рис. 8, а). Результаты эксперимента приведены на графике (рис. 8, б).



а



б

Рис. 8. Испытания на разрывной машине FP100 (а) и зависимость усилия на разрыв проколотого (1) и просверленного (2) образцов от диаметра отверстия (б)

На основании результатов эксперимента можно сделать следующие выводы.

1. Коэффициент концентрации напряжений на краях полученных отверстий, а следовательно, и допустимые напряжения в соединении

при сверлении отвержденного КМ, прокалывании неотвержденного КМ и препрега при малых диаметрах отверстий примерно одинаковы. Другими словами, при формировании отверстий диаметром 2 мм и описанных характеристиках препрега коэффициент концентрации напряжений на поверхности отверстия не зависит от методов его получения. Поэтому отверстия малых диаметров в соединениях лучше выполнять традиционным методом — сверлением.

2. С увеличением диаметра отверстий наблюдается существенное увеличение коэффициента концентрации напряжений вокруг отверстий, что значительно снижает прочность соединений КМ с отверстиями, полученными сверлением и прокалыванием.

## ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Граймс Г.К., Грейман Л.Ф. Расчет концентраторов, кромочных эффектов и соединений. *Композиционные материалы*. Браутман Л., Крок Р., ред. Т. 8, часть 2. Чамис К., ред. Москва, Машиностроение, 1978, 264 с.
- [2] Ван Фо Фы Г.А. Концентрация напряжений около отверстий в пластинах и оболочках из армированных материалов. *Композиционные материалы волокнистого строения*. Киев, Наукова думка, 1970. 404 с.
- [3] Официальный сайт компании ISCAR. URL: <http://www.iscar.com> (дата обращения 15.04.2014).
- [4] Официальный сайт компании SANDVIK. URL: <http://www.sandvik.coromant.com> (дата обращения 15.04.2014).
- [5] Комков М.А., Колганов А.В. Моделирование процесса формирования отверстий в композитных конструкциях методом прокалывания неотвержденного полимерно-волокнистого материала. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 3. с. 33–47.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 3.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1332.html>

**Болотин Юрий Зиновьевич** родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: обработка композиционных материалов. e-mail: [ub52@mail.ru](mailto:ub52@mail.ru)

**Васильева Татьяна Владимировна** родилась в 1964 г., окончила Московский государственный авиационно-технологический университет им. К.Э. Циолковского в 1995 г. Ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: обработка композиционных материалов. e-mail: [vvtv64@mail.ru](mailto:vvtv64@mail.ru)

**Василенко Екатерина Валерьевна** родилась в 1989 г. Студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [ekaterina\\_vasilenko\\_1989@mail.ru](mailto:ekaterina_vasilenko_1989@mail.ru)

## Comparison of working capacity of designs from composite materials with holes executed by puncturing and drilling

© Yu.Z. Bolotin, T.V. Vasilyeva, E.V. Vasilenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article shows prospects of composite materials application. We provide general concepts and terms of composite materials, the technology of the assembly of highly responsible and structural elements, drawbacks of the existing technology. An overview presents advanced tools for the composite materials processing. When using these tools the stress concentration around the drilled holes is reduced. The offered method of changing the assembly technology is illustrated by the results of experiments. It is shown that the prepreg obtained strength characteristics similar to those obtained on the uncured composite material. The results of the work can be used in rocket and space technology.*

**Key terms:** composite material, filler, matrix, binder, the prepreg, curing, drilling, puncturing.

### REFERENCES

- [1] Grimes G.K., Greiman L.F. Raschet kontsentratorov, kromochnykh effektov I soedideniy [Calculation of hubs, edge effects and connections]. In: *Composite Materials*. New York, 1975. [in Russian: Kompozitsionnye materialy. Vol. 8, part 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 264 p.].
- [2] Van Fo Fy G.A. Kontsentratsiya napryazheniy okolo otverstiy v plastinakh I obolochkakh iz armirovannykh materialov [Stress concentration around the holes in the plates and shells made of reinforced materials]. In: *Kompozitsionnye materialy voloknistogo stroeniya* [Composites of fibrous structure]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1970, 404 p.
- [3] *Website of ISCAR*. Available at: [www.iscar.com](http://www.iscar.com) (accessed on 15.04.2014).
- [4] *Website of SANDVIK*. Available at: [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com) (accessed on 15.04.2014).
- [5] Komkov M.A., Kolganov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashibostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2007, no. 3, pp. 33–47.

**Bolotin Yu.Z.** (b. 1952) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1983. Senior lecturer at the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” of Bauman Moscow State Technical University. Sphere of researches includes processing of composite materials. e-mail: [ub52@mail.ru](mailto:ub52@mail.ru)

**Vasilyeva T.V.** (b. 1964) graduated from the Tsyolkovsky Moscow State Aviation Technological University in 1995. Assistant lecturer at the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” of Bauman Moscow State Technical University. Sphere of researches includes processing of composite material. e-mail: [vtv64@mail.ru](mailto:vtv64@mail.ru)

**Vasilenko E.V.** (b. 1989) is a student of the Department “Technologies of Rocket and Space Engineering” at Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [ekaterina\\_vasilenko\\_1989@mail.ru](mailto:ekaterina_vasilenko_1989@mail.ru)