

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-6-5-12

УДК 621.95.01

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

### THE INFLUENCE OF QUALITY OF CUT SURFACE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF PARTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS

**Марков Андрей Михайлович**,  
доктор техн. наук, профессор e-mail: andmarkov@inbox.ru  
**Andrei M. Markov**, Dr. Sc.in Engineering  
**Некрасов Вячеслав Николаевич**,  
канд. техн. наук, доцент e-mail: sla44@mail.ru  
**Nekrasov Vyacheslav N.**, C. Sc. In Engineering  
**Андреев Михаил Витальевич**,  
Канд. техн. наук, доцент e-mail: m194@mail.ru  
**Mikhail V. Andreev**, C. Sc. In Engineering  
**Гайст Сергей Валерьевич**,  
ассистент, e-mail: sergei-gaist@mail.ru  
**Sergei V. Gayst**, Assistant  
**Су Цзянь**,  
аспирант, e-mail: 278507234@qq.com  
**Su Jian**, Postgraduate  
**Салман Азхар Мансур**,  
аспирант, e-mail: azharmansoor76@gmail.com  
**Azhar M. Salman**, Postgraduate

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, пр. Ленина, 46, г.  
Барнаул, 656038, Россия  
Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenin Avenue, Barnaul, 656038, Russian Federation

#### **Аннотация:**

*Композиты на основе полимеров широко используются в современной промышленности. Они обладают высокой прочностью при низком удельном весе, высокой устойчивостью к коррозии, низкой теплопроводностью и др. Однако композитные материалы имеют и недостатки: их невозможно соединить сваркой и склеиванием. Поэтому для создания пространственных конструкций из композитов часто используются заклепочные соединения. При этом наличие в деталях отверстий под заклепки часто приводит к ослаблению несущей способности конструкции. Кроме того, сколы на обрабатываемой поверхности и расслоение материала способствуют созданию концентраторов напряжений. Целью исследования является изучение закономерностей формирования показателей качества отверстий под заклепочное соединение в композиционном материале и оценка их влияния на прочностные характеристики соединяемых деталей. В работе получена степенная зависимость между подачей и скоростью резания при сверлении отверстия и прочностью образца на растяжение и дана оценка влияния выбранного диапазона режимов резания на прочность образца на растяжение.*

**Ключевые слова:** композиционный материал, отверстие под заклепку, режимы резания, прочность на разрыв, деламинация, факторный эксперимент.

**Abstract:**

*Polymer-based composites are widely used in modern industry. They have high strength at low specific gravity, high resistance to corrosion, low thermal conductivity, etc. However, composite materials also have disadvantages: it is impossible to connect them by welding and gluing. Therefore, rivet connections are often used to create spatial structures. Rivet holes lead to a weakening of the load-bearing capacity of the structure. In addition, chips on the treated surface and delamination of the material (delamination) lead to the creation of stress concentrators. Objective: to study the process of forming quality indicators for a rivet joint in a composite material and assess their impact on the strength characteristics of the parts to be joined. Results: power-law relationship between feed and cutting speed when drilling a hole and the tensile strength of the sample; evaluation of the effect of the selected range of cutting modes on the tensile strength of the sample.*

**Key words:** composite material, the hole for the rivet, the cutting conditions, tensile strength, delamination, factorial experiment.

Возрастающие требования к материалам, применяемым в современных машинах, агрегатах и механизмах, определяют все более широкое применение композитов на полимерной основе. К свойствам, определяющим выбор в пользу использования таких материалов, в первую очередь относятся их достаточно высокая прочность при низком удельном весе, высокая стойкость к коррозии, низкая теплопроводность и др.

Однако большинству композиционных материалов присущи и недостатки, в частности, невозможность их соединения методом сварки и склеивания. В связи с этим для создания пространственных конструкций часто используют заклепочные соединения. Из-за особенностей строения композиционного материала наличие отверстий под заклепки может приводить к ослаблению несущей способности конструкции, так как при их изготовлении методом механической обработки (сверление, пробивание) нарушается целостность структуры из-за перерезания волокон композитной матрицы. Кроме того, погрешности механической обработки

отверстия в виде сколов на обработанной поверхности и расслоения материала (деламинации) приводят к созданию концентраторов напряжений [1,2,3,19].

Для обеспечения необходимой прочности заклепочного соединения деталей используют различные конструкторско-технологические решения, часть из которых представлена на рисунке 1. Однако в большинстве случаев это может приводить к удорожанию конструкции, возрастанию затрат на технологическую подготовку производства и реализацию операций механической обработки и сборки, что в конечном счете увеличивает трудозатраты и себестоимость изделия [4,5,6,].

И все же наиболее распространенным способом механического соединения деталей является стержневая заклепка. При этом одним из ключевых факторов, определяющих прочность клепочного соединения, является качество изготовления отверстия. Основными дефектами получаемого отверстия являются [4, 5,18]:

– деламинация – расслоение композиционного материала из-за разрушения

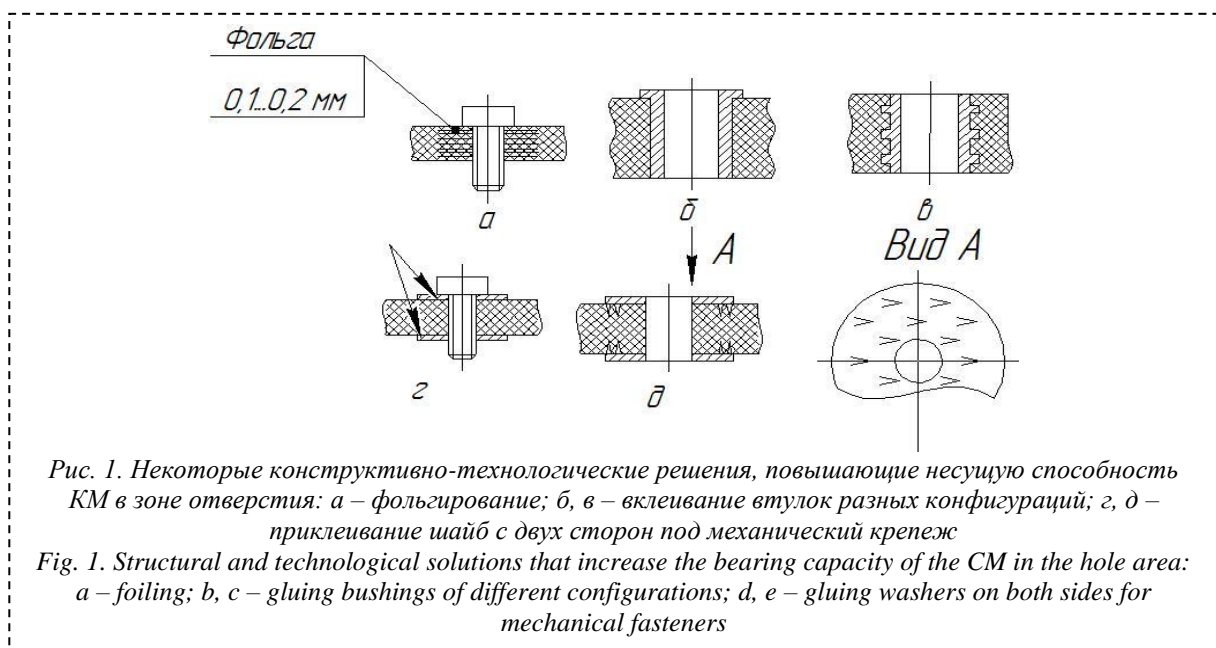


Таблица 1. Физико-механические свойства материала экспериментальных образцов  
 Table 1. Physical and mechanical properties of the material of experimental samples

Наименование показателя	Значение показателя
Композиционный состав	Стеклоткань, эпоксифенольное связующее
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600-1900
Длительно допустимая рабочая температура	от -65°С до +155°С
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа, не менее	350
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	220
Ударная вязкость по Шарпи параллельно слоям на образцах с надрезом, КДж/м <sup>2</sup> , не менее	50

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента  
 Table 2. Experiment planning matrix

№	Параметры режимов резания	
	V (м/мин)	S (мм/зуб)
1	3(-)	0,025(-)
2	3(-)	0,4(+)
3	50(+)	0,4(+)
4	50(+)	0,025(-)

наполнителя матрицы под воздействием осевой составляющей силы резания;

– сколы – локальные (в пределах прилегающих к отверстию объемов) разрушения матрицы и наполнителя композиционного материала.

Для обеспечения требуемых показателей качества поверхности отверстия (средняя высота шероховатости менее 4,8 мкм; размер зоны деламинации и сколов – не более 5% от диаметра отверстия) используют расчет оптимальных режимов резания и назначение конструктивно-геометрических параметров сверла. При этом в литературных источниках нет результатов исследований влияния прочностных свойств заклепочного соединения на качество отверстий в сопрягаемых деталях [7,8,9,10,15].

Таким образом, цель исследования заключается в изучении закономерностей формирования показателей качества отверстий под заклепочное соединение в композиционном материале и оценке их влияния на прочностные характеристики соединяемых деталей.

Задачи исследования:

1. Получить зависимость качества обработанной поверхности отверстия в композиционном материале от режимов резания;

2. Установить зависимости влияния предела прочности обработанных деталей от качества изготовленного отверстия.

Решение первой задачи осуществляется с использованием методики полнофакторного эксперимента: необходимо провести серию экспериментов, где в качестве экспериментальных образцов для исследований выбрана заготовка из стеклотекстолита (марка СТЭФ) габаритными размерами 200x3x12 мм. Технические характеристики представлены в таблице 1.

В качестве режущего инструмента выбраны стандартные сверла (ГОСТ 10902-77), выполненные из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 3 мм.

При сверлении отверстия в детали возникли дефекты на входе и выходе из отверстия, обусловленные силовым воздействием сверла на материал, что впоследствии может способствовать снижению прочности.

В ходе проведения экспериментов требуется получить зависимость следующего вида:

$$R_{зд} = A \cdot V^x \cdot S^y, \text{ где} \quad (1)$$

$R_{зд}$  – зона деламинации, мм;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, м/об.

Режимы резания изменялись в следующих диапазонах: скорость резания ( $V$ ) от 3 м/мин до 50 м/мин; подача ( $S$ ) от 0,025 мм/об до 0,4 мм/об [5,6,7,11,12,13,14].

Контроль качества обработанной поверхности осуществлялся инструментальным микроскопом,

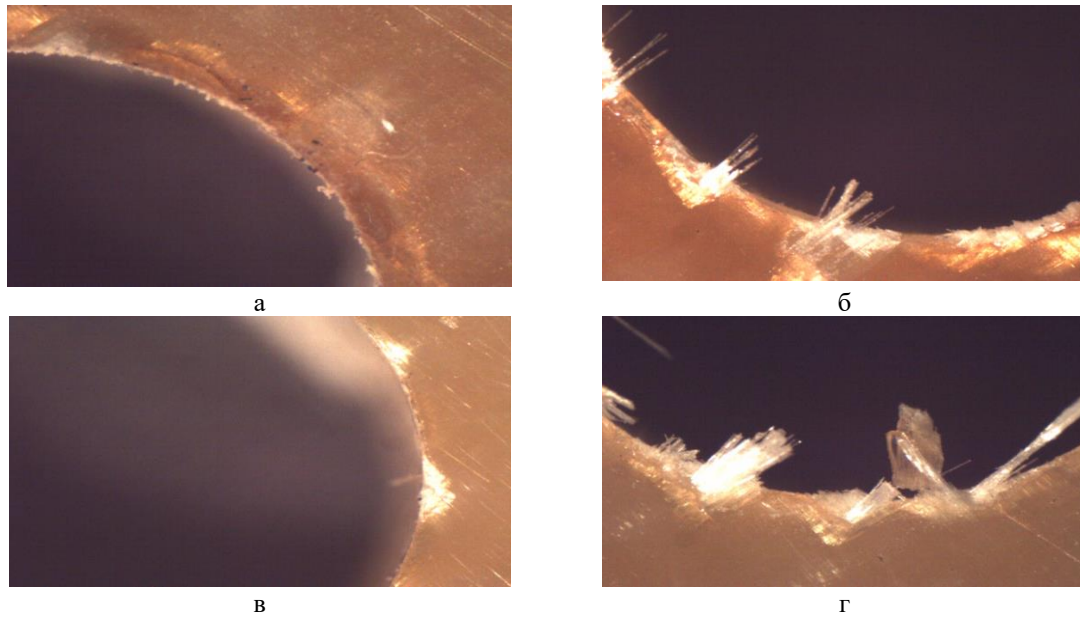


Рис. 2. Зоны дефекта обработанного отверстия: а –  $V=3\text{ м/мин}$ ;  $S=0,025\text{ мм/об}$ ; б –  $V=3\text{ м/мин}$ ;  $S=0,4\text{ мм/об}$ ; в –  $V=50\text{ м/мин}$ ;  $S=0,025\text{ мм/об}$ ; г –  $V=50\text{ м/мин}$ ;  $S=0,4\text{ мм/об}$   
 Fig. 2. Defect zones of the machined hole: а –  $V = 3\text{ m / min}$ ;  $S = 0.025\text{ mm / rev}$ ; б –  $V = 3\text{ m / min}$ ;  $S = 0.4\text{ mm / rev}$ ; в –  $V = 50\text{ m / min}$ ;  $S = 0.025\text{ mm / rev}$ ; г –  $V = 50\text{ m / min}$ ;  $S = 0.4\text{ mm / rev}$

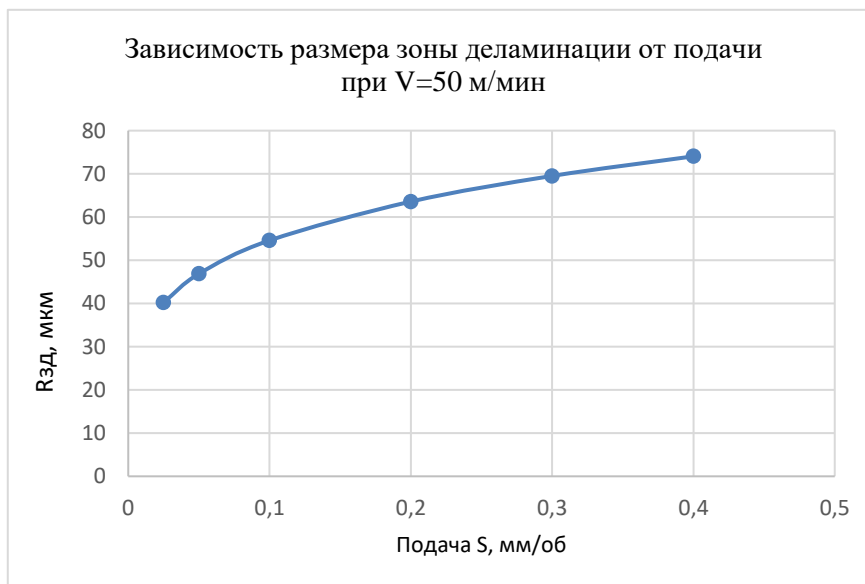


Рис. 3. Зависимость размера зоны деляминации от подачи при  $V=50\text{ м/мин}$   
 Fig. 3. Dependence of the size of the delamination zone on the feed at  $V = 50\text{ m / min}$

оснащенным видеокамерой BR-5101LC-UF с выводом на компьютер.

В ходе проведения полнофакторного эксперимента сверления стеклотекстолита были получены образцы отверстий с различными зонами дефекта, которые представлены на рисунке 2 [16,17].

Как видно из рисунка 2а, при минимальной скорости подачи дефектный слой проявляется в виде деляминации внутренних слоев, а при максимальной подаче и скорости резания вокруг обрабатываемого отверстия возникают сколы и

наличие фрагментов волокон внутри отверстия. Также следует заметить, что возникновение сколов и вырывов в большей степени зависит от подачи, что подтверждается полученной зависимостью следующего типа:

$$R_{зд} = 139,32 \cdot V^{-0,11} \cdot S^{0,22} \quad (2)$$

Установление зависимости влияния прочностных свойств обработанных деталей от качества обработанного отверстия осуществлялось на универсальной электромеханической испытательной машине (Instron-3369). Испытания проводились согласно ГОСТ 33375-2015.



Рис. 4. Образцы после разрыва: а –  $V=3\text{ м/мин}$ ;  $S=0,025\text{ мм/об}$ ; б –  $V=3\text{ м/мин}$ ;  $S=0,4\text{ мм/об}$ ; в –  $V=50\text{ м/мин}$ ;  $S=0,025\text{ мм/об}$ ; г –  $V=50\text{ м/мин}$ ;  $S=0,4\text{ мм/об}$   
 Fig. 4. Samples after tearing: а –  $V = 3\text{ m / min}$ ;  $S = 0.025\text{ mm / rev}$ ; б –  $V = 3\text{ m / min}$ ;  $S = 0.4\text{ mm / rev}$ ; в –  $V = 50\text{ m / min}$ ;  $S = 0.025\text{ mm / rev}$ ; г –  $V = 50\text{ m / min}$ ;  $S = 0.4\text{ mm / rev}$

### Образцы с 1 по 4

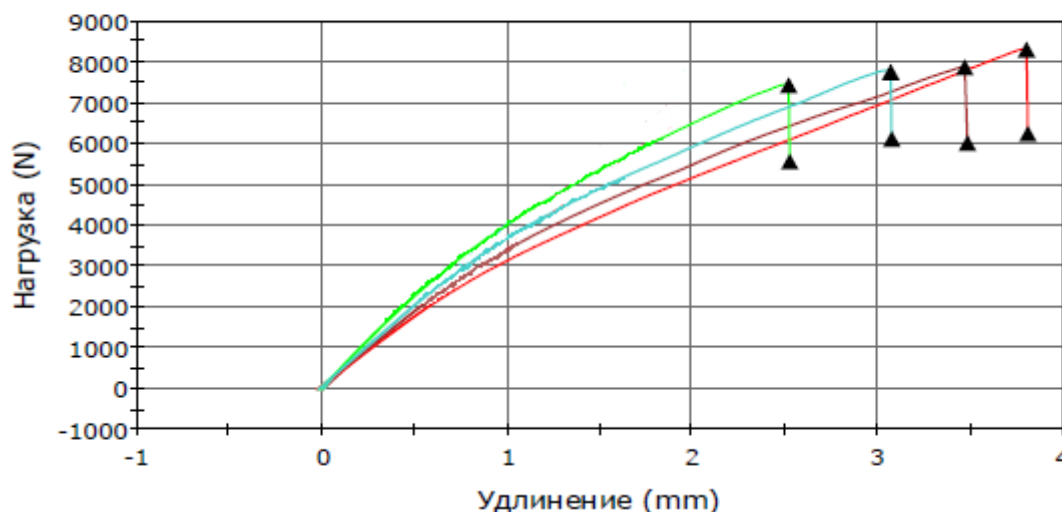


Рис. 5. График зависимости усилия сопротивления разрушению в зависимости от величины перемещения траверсы испытательной машины.  
 Fig. 5. The graph of the dependence of the resistance to destruction depending on the magnitude of the displacement of the crosshead of the testing machine

Приложение нагрузки через траверсу происходило до разрушения образцов: фиксировался момент, когда образец лишался способности сопротивляться разрушению (рисунок 4).

Результатом проведенного эксперимента была выявлена зависимость между режимами резания при сверлении отверстия в образце из композиционного материала и прочностью при разрыве образца:

$$\sigma = 6229 \cdot V^{-0.017} \cdot S^{-0.01}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – прочности при разрыве, МПа;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, м/об.

Сравнительный анализ результатов испытаний показывает, что для образцов с

отверстием, полученным при минимальных значениях режимов резания ( $V=3\text{ м/с}$ ;  $S=0,025\text{ мм/об}$ ), максимальное значение сопротивления разрушению составило 6,4 кН (рисунок 6), а при максимальных значениях скорости резания и подачи оно ( $V=50\text{ м/с}$ ;  $S=0,4\text{ мм/об}$ ) составляет 5,7 кН. Разница составляет 11%.

### Выводы

1. Установлено влияние в виде степенной зависимости (2) режимов резания при сверлении отверстия в образце из композиционного материала на прочность при разрыве образца.

2. Определено, что размер зоны деламинации при механической обработке композиционного

материала зависит от режимов резания и оказывает существенное влияние на прочностные характеристики детали. При этом, согласно полученной зависимости, наибольшее влияние оказывает подача на оборот.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании заклепочных

соединений в конструкциях из стеклотекстолита, а также могут являться элементом автоматизированной системы проектирования технологических процессов механической обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов, Я. С. Соединение деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.
2. Слишкоухов Ю. В. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст] / Ю. В. Слишкоухов, В. Д. Буданов. – М.: Стройиздат, 1986. – 545 с.
3. Карпов, Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: [Текст]: учебник / Я. С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2010. – 768 с.
4. Каталог Сандвик Коромант CoroKey [Текст]. – [Б. м.], 2016. – 514 с.
5. Исследование влияния технологических параметров на прочность резьбового соединения в деталях из углепластика / А. М. Марков, В. Н. Некрасов, А. М. Салман, С. В. Гайст, С. Цзянь // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 6-15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15.
6. Марков А. М., Некрасов В. Н., Су Ц., Салман А. М., Гайст С. В., Андреев М. В. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 6-17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-6-17.
7. Марков А. М., Некрасов В. Н., Цзянь Су, Салман А. М., Гайст С. В. Исследование механизма резания армированных стекловолокнистых композиционных материалов при фрезеровании и анализ их микрофотографий // ООО «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением» (Москва). – 2020. – Т.8, – С. 11-16.
8. Veazey D., Gomez E. D., Hsu T. Next generation high-performance carbon fiber thermoplastic composites based on polyaryletherketones // Journal of applied polymer science. 2017. Vol. 134, is. 6. P.44441. DOI .org/10.1002/app.44441.
9. Neo Y., Malakooti M. H., Sodano H. A. Self-healing polymers and composites for extreme environments // Journal of Materials Chemistry A. 2016. Vol. 4, is.44. P. 17403-17411. DOI 10.1039/C6TA06213J.
10. Макаров В. Ф., Мешкас А. Е., Ширинкин В. В. Исследование проблем механической обработки современных высокопрочных композиционных материалов, используемых для производства деталей авиационной и ракетно-космической техники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. 2015. Т. 17, №2. С. 30-41.
11. Drilling of Thick Composite Materials Using A Step Gundrill / P. Rahme, Y. Landon, F. Lachaud, R. Piquet, P. Lagarrigue // Composites Part A: Applied Science And Manufacturing. 2017. Vol. 103. P. 304-313. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.10.016.
12. Pihtili H., Canpolat N. Investigation of different reinforced composite materials for surface roughness and capacity of being drilled // Journal of Composite Materials. 2009. Vol. 43, is. 19. P. 2071-2080. DOI 10.1177/0021998309340934.
13. Карасов Т. А., Храмовских В. В., Жихарев В. С. Проблемы резания композитов с высокопрочными наполнителями // Механика XXI веку. 2017. № 16. С. 93-97.
14. Engineering method for the thermal mechanical erosion of c/c composite with the mesoscale ablation model / D. Deng, J. Yu, F. Huang, X. Luo, X. Yan // Polymers and polymer composites. 2014. Vol.22, is. 2. P.181-186. DOI 10.1177/096739111402200215.
15. Марков А. М., Макарова Н. А., Гайст С. В. Износ инструмента при фрезеровании стеклопластика // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. №4(70). С. 25-30.

16. Рычков Д. А., Янюшкин А. С. Способ повышения эффективности производства изделий из полимерных композитов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 3 (72). С. 23-30. DOI 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.
17. Экспериментальное исследование процесса формирования показателей качества при фрезеровании стеклопластика /С. В. Гайст, С. А. Катаева, А. М. Марков, П. О. Черданцев, Е. Ю. Лапенков// *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. № 3 (51). С. 129-136. DOI 10.12737/22052.
18. Рычков Д. А., Афанасенко П. В., Кириченко О. П. Специфика изнашивания режущего инструмента при обработке полимерных композиционных материалов // *Механика XXI века*. 2018. № 17. С. 135-139.
19. Machining accuracy analysis for step multi-element varying-parameter vibration drilling of laminated composite materials / Z.J. Li, M.S. Hong, H. Su, Y.L. Wei // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003. Т. 21, № 10-11. С.760-768. DOI 10.1007/s00170-002-1391-2.

## REFERENCES

1. Karpov, Ya. S. Connection of parts and assemblies made of composite materials - Har'kov: Nacional'nyj aerokosmicheskij universitet [National aerospace University]. 2006. 359 p.
2. Slickouhov Yu. V., Budanov V. D. Wood and plastic structures. Moscow. Strojizdat. 1986. 545 p.
3. Karpov, Ya. S. Design parts and assemblies from composite materials: the textbook. Har'kov: Nacional'nyj aerokosmicheskij universitet [National aerospace University]. 2010. 768 p.
4. Directory Of Sandvik Coromant CoroKey. 2016. 514 p.
5. Markov A. M., Nekrasov V. N., Salman A. M., Gayst S. V., Su J. Study of the influence of technological parameters on the strength of a threaded connection in carbon fiber parts. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 6-15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.2-6-15. (In Russian).
6. Markov A. M., Nekrasov V. N., Su J., Salman A. M., Gayst S. V., Andreev M. V. Technological assurance of fiberglass composites surface layer quality during end milling. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 31-40. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-31-40. (In Russian).
7. Markov A. M., Nekrasov V. N., Czuan' Su, Salman A. M., Gajst S. V. Investigation of the cutting mechanism of reinforced fiberglass composite materials during milling and analysis of their micrographs. Forging and stamping production. LLC «Pressure treatment of materials». Moscow. 2020. p.11-16.
8. Veazey D., Gomez E. D., Hsu T. Next generation high-performance carbon fiber thermoplastic composites based on polyaryletherketones // *Journal of applied polymer science*. 2017. Vol. 134, is. 6. P.44441. DOI .org/10.1002/app.44441.
9. Heo Y., Malakooti M. H., Sodano H. A. Self-healing polymers and composites for extreme environments // *Journal of Materials ChemistryA*. 2016. Vol. 4, is. 44. P. 17403-17411. DOI 10.1039/C6TA06213J.
10. Makarov V. F., Meshkas A. E., Shirinkin V. V. Investigation of problems of mechanical processing of modern high-strength composite materials used for the production of parts of aviation and rocket and space technology // *Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Engineering*. 2015. Vol. 17, No. 2. Pp. 30-41.
11. Drilling of Thick Composite Materials Using A Step Gundrill / P. Rahme, Y. Landon, F. Lachaud, R. Piquet, P. Lagarrigue // *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*. 2017. Vol. 103. P. 304-313. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.10.016.
12. Pihtili H., Canpolat N. Investigation of different reinforced composite materials for surface roughness and capacity of being drilled // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43, is. 19. P. 2071-2080. DOI 10.1177/0021998309340934.
13. Karasov T. A., Khramovskikh V. V., Zhikharev V. S. Problems of cutting composites with high-strength fillers // *Mechanics of the XXI century*. 2017. no. 16. Pp. 93-97.
14. Engineering method for the thermal mechanical erosion of c/c composite with the mesoscale ablation model / D. Deng, J. Yu, F. Huang, X. Luo, X. Yan // *Polymers and polymer composites*. 2014. Vol. 22, is. 2. P.181-



186. DOI 10.1177/096739111402200215.

15. Markov A. M., Makarova N. A., Gast S. V. Tool wear when milling fiberglass // science-Intensive technologies in mechanical engineering. 2017. No. 4 (70). p. 25-30.

16. Rychkov D. A., Yanyushkin A. S. Method for improving the efficiency of products from polymer composites. Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science, 2016, no. 3, pp. 23-30. DOI: 10.17212/1994-6309-2016-3-23-30.

17. Experimental study of the process of forming quality indicators when milling fiberglass /S. V. Gaist, S. A. Kataeva, A. M. Markov, P. O. Cherdantsev, E. Yu. Lapenkov// Bulletin of the Bryansk state technical University. 2016. No. 3 (51). P. 129-136. DOI 10.12737/22052

18. Rychkov D. A., Afanasenko P. V., Kirichenko O. P. Specifics of cutting tool wear when processing polymer composite materials //Mechanics of the XXI century. 2018. No. 17. p. 135-139.

19. Machining accuracy analysis for step multi-element varying-parameter vibration drilling of laminated composite materials / Z. J. Li, M. S. Hong, H. Su, Y. L. Wei //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003. T. 21, № 10-11. C.760-768. DOI 10.1007/s00170-002-1391-2.

Поступило в редакцию 10.12.2020  
Received 10 December 2020