

УДК 621.9.044, 621.373.8

DOI: 10.12737/article_59f074a74e34b9.05403488

С.А. Котов, ведущий инженер
(ООО «НТО «ИРЭ-Полюс», МО, г. Фрязино,
пл. им. академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3)

А.Г. Григорьянц, д.т.н.,

И.Н. Шиганов, д.т.н.,

Ю.Ю. Инфимовский, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

В.В. Блинков, к.т.н.

(ОАО «НИАТ»; 117587, г. Москва, ул. Кировоградская, д.3)

E-mail: bauman@bmstu.ru, skotov@ntoire-polus.ru, vblinkov@niat.ru

Научно-технологическая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера

В результате проведенных экспериментальных исследований по размерной обработке углепластика толщиной 3 мм с матрицей на основе эпоксидной смолы непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм определены основные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество и скорость обработки. Проведено сравнительное исследование влияния способа обработки на механическую прочность исследуемых образцов в соответствии с ГОСТ 33375-2015.

Ключевые слова: непрерывный волоконный иттербиевый лазер; лазерная обработка; зона термического влияния; полимерные композиционные материалы; углепластики.

S.A. Kotov, Principle engineer,
(Co. Ltd STO "IRE-Pole"; Building 3, 1, Academician Vvedensky Sq., Fryazino, Moscow region)

A.G. Grigoriyants, D. Eng.,

I.N. Shiganov, D. Eng.,

Yu.Yu. Infimovskiy, Can. Eng.,

(Bauman STU of Moscow; Building 1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 1005005)

V.V. Blinkov, Can. Eng.

(PC "NIAT"; 3, Kirovogradskaya Str., Moscow, 117587)

Science intensive technology for efficiency increase in carbon plastic dimension processing through continuous emission of fiber ytterbium laser

As a result of the experimental investigations carried out on the dimension processing of carbon plastic of 3mm thick with the matrix on the basis of epoxy resin by continuous emission of the fiber ytterbium laser with $\lambda=1.06$ mkm of the wave length there are defined basic technological parameters ensuring high quality and processing speed. A comparative investigation of the processing method impact upon mechanical strength of samples investigated in accordance with RSS 33375-2015 is carried out.

Keywords: continuous fibrous ytterbium laser; laser processing; thermal impact area; polymer composites; carbon plastic.

Введение

Углепластики благодаря уникальному ком-

плексу технологических и эксплуатационных свойств являются одним из ключевых мате-

риалов, определяющих развитие в таких современных отраслях промышленности как авиастроение, автомобилестроение, судостроение, строительство и др. Углепластики, являются волокнистым полимерным композиционным материалом (ВПКМ), обладающим высокой технологичностью и регулируемыми конструктивными свойствами, которые обеспечиваются сочетанием высокопрочных углеродных волокон (нитей, лент, тканей различной текстуры) с термореактивными и термопластичными связующими матрицами на основе эпоксидных, фенолоальдегидных, имидных и др. смол [1, 2].

На финальном этапе производства изделий из углепластика требуется точная размерная обработка по внутренним и внешним контурам формованных деталей и по формированию отверстий различного назначения: под сборочно-монтажные операции, под предварительную технологическую сборку, технологических, базовых и контрольных отверстий.

Для выполнения этих операций применяются механическая обработка режущим инструментом, гидроабразивная и лазерная резка. Проблемы при обработке углепластиков определяются их сложным строением: слоистой структурой, неоднородностью состава и высокой анизотропией теплофизических свойств. Каждый способ обработки характеризуется определенными преимуществами и недостатками, их основные характеристики приведены в работах [3 – 6].

Лазерная обработка обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами: отсутствие изнашиваемого инструмента, высокие скорость и точность резки, гибкость настройки технологических параметров режима обработки, стабильное качество и отсутствие ограничений на контур раскроя и габариты детали.

При этом основной технологической проблемой при лазерной обработке является образование зоны термического влияния (ЗТВ), в которой нарушается прочность сцепления углеродных волокон наполнителя со связующей матрицей, что приводит к снижению упругопрочностных свойств. Поэтому для достижения высокого качества лазерной обработки углепластиков возникает необходимость проведения комплекса исследований по определению алгоритма и технологических параметров режима обработки.

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка на основе непре-

рывного одномодового иттербиевого волоконного лазера мод. ЛК-1000-ОМ производства НТО «ИРЭ-Полус», ее структурная схема приведена на рис.1. Она состоит из следующих основных компонентов:

1. Мощный непрерывный одномодовый волоконный лазер мод. ЛК-1000-ОМ;
2. Двухосевой гальваносканер с входной апертурой 12 мм и скоростью развертки луча до 10 м/с;
3. F-Theta линза с фокусным расстоянием $F= 254$ мм и размером рабочего поля 160×160 мм;
4. Специализированный управляющий контроллер с программным обеспечением.



Рис. 1. Структурная схема экспериментальной технологической установки

Для расчета основных параметров сфокусированного обрабатывающего светового пятна были использованы следующие формулы [7 - 10]:

$$D = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0} \cdot M^2 \cdot f -$$

диаметр сфокусированного пятна, (1)

$$2 \cdot z = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \lambda} -$$

глубина фокуса (длина перетяжки), (2)

где λ – длина волны падающего излучения; D_0 – диаметр коллимированного пучка по уровню $1/e^2$; M^2 – параметр качества пучка; f – фокусное расстояние объектива.

Основные технические параметры технологической установки приведены в табл. 1.

1. Технические параметры экспериментальной технологической установки

Тип лазера	Длина волны излучения, мкм	Режим работы	Выходная мощность излучения, Вт	Параметр качества пучка M^2	Фокусное расстояние объектива, мм	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм	Глубина фокуса, мм	Плотность мощности излучения, Вт/см ²
ЛК-1000-ОМ	1,06	Непрерывный	1000	1,09	254	71	7,5	$2,5 \cdot 10^7$

В работе в качестве исследуемого материала использовался углепластик марки М21/35%/Т700 толщиной 3 мм, изготовленный методом прямого прессования с ортотропной схемой армирования. В данном материале в качестве армирующего волокнистого наполнителя (АВН) применяется углеровинг Т700 фирмы Тогау (Япония) и связующая матрица на основе эпоксидных смол марки М21 фирмы Нехсел (США). Массовое содержание АВН в материале составляет 65 %.

Методика оценки качества обработки. Показатели качества технологического процесса лазерной обработки углепластика приведены на рис. 2 [7].



Рис. 2. Показатели качества

Методики оценки ЗТВ и определения дефектов микрогеометрии канала реза подробно рассмотрены в работах [11, 12], в которых по ЗТВ принято определять три класса качества деталей:

1. Класс А (высокое качество): длина АВН без матрицы (зона полной термодеструкции) $H_{ЗТВ} \leq 50$ мкм, отсутствие видимого теплового повреждения материала матрицы (зоны с частичной термодеструкцией);

2. Класс Б (удовлетворительное качество): $50 \leq H_{ЗТВ} \leq 150$ мкм, допускается видимое тепловое повреждение материала матрицы;

3. Класс С (неудовлетворительное качество): $H_{ЗТВ} \geq 150$ мкм, значительное тепловое повреждение материала матрицы.

Для обеспечения высокой точности изготавливаемых деталей, в частности сквозных отверстий различного назначения, требуется обеспечить минимально возможную конусность канала реза. Так, например, для обеспечения требуемой точности в соответствии с ГОСТ 30893.1-2003 необходимо выполнение обработки по качеству Н12.

Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства деталей и устанавливается исходя из функционального назначения поверхности. Экономически целесообразные значения шероховатости поверхности, соответствующие заданной точности изготовления, приведены в справочнике [13]. Так, например, при обработке отверстия по качеству Н12 рекомендуемая шероховатость поверхности не должна быть больше $Rz = 40$ мкм.

В данной работе измерение ширины канала реза и ЗТВ на поверхности образца со стороны входа и выхода луча проводилось при помощи оптического микроскопа TESCAN MIRA3. Исследование дефектов внутренней структуры (расслоение материала, повреждение матрицы) осуществлялось на микрошлифе этим же микроскопом. Измерение конусности канала реза проводилось при помощи контурографа MitutoyoContracer CV-2100. Шероховатость поверхности канала реза оценивалась на контактном профилометре Протон «Модель 130», а наличие дефектов (расслоение, трещины, повреждение материала матрицы) – на электронном сканирующем микроскопе TESCANMIRA3.

Результаты экспериментальных исследований. При лазерной резке углепластиков наиболее предпочтительным и часто реализуемым на практике является механизм испарения. При этом разрушение многокомпонентных полимерных композиционных материалов, представляющих собой сложное химическое соединение, происходит в виде па-

рокапельной фазы и является процессом термодеструкции с выделением газообразных продуктов и образованием коксового остатка [7, 14].

В ходе экспериментов обработка образцов на установке осуществлялась в многопроход-

ном режиме без подачи технологического газа – в атмосфере воздуха. Применяемые алгоритмы обработки схематично представлены на рис. 3. Длина прямой линии составляла 30 мм, диаметр сквозных отверстий 6, 8 и 16 мм.

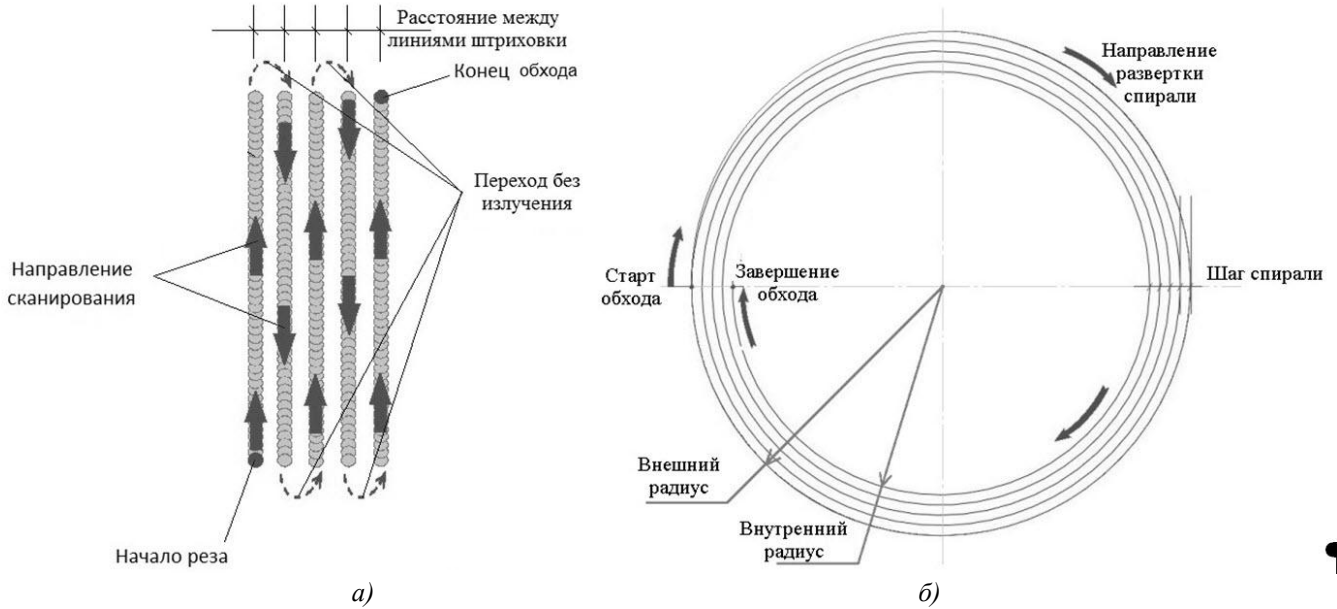


Рис. 3. Алгоритмы обработки: а – прямой рез; б – сквозное отверстие

В результате проведенных экспериментов были определены параметры режима обработки, при которых достигается высокое качество детали по установленным критериям оценки. Мощность излучения составляла 1кВт; положение фокуса – по середине образца; расстояние между линиями штриховки – 50 мкм; количество линий и скорость перемещения луча

изменялись в процессе обработки с 9 до 3 и от 1000 до 750 мм/с, соответственно. Для снижения эффекта накопления тепла в материале была введена пауза между проходами длительностью $\approx 0,5$ с. Результаты лазерной обработки углепластика толщиной 3 мм показаны на рис. 4 и 5.

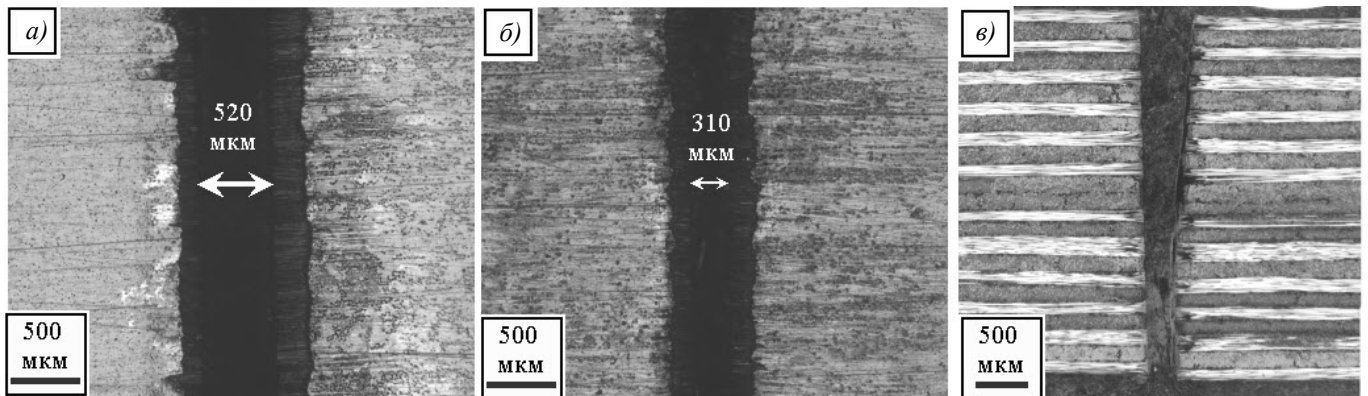


Рис. 4. Результаты обработки непрерывным лазером:

а и б – поверхность образца углепластика со стороны входа и выхода луча; в – микрошлиф поперечного сечения канала реза

Непрерывный лазер обеспечивает высокое качество детали по установленным показателям качества: ЗТВ характеризуется незначительным термоследом на поверхности материала со стороны входа и выхода луча шириной ≈ 150 мкм, конусность составляет менее

100 мкм, шероховатость по Rz – около 40 мкм, расслоение и растрескивание на поверхности канала реза отсутствуют. При обработке детали по протяженным контурам возможно достижение скорости обработки до 1 м/мин.

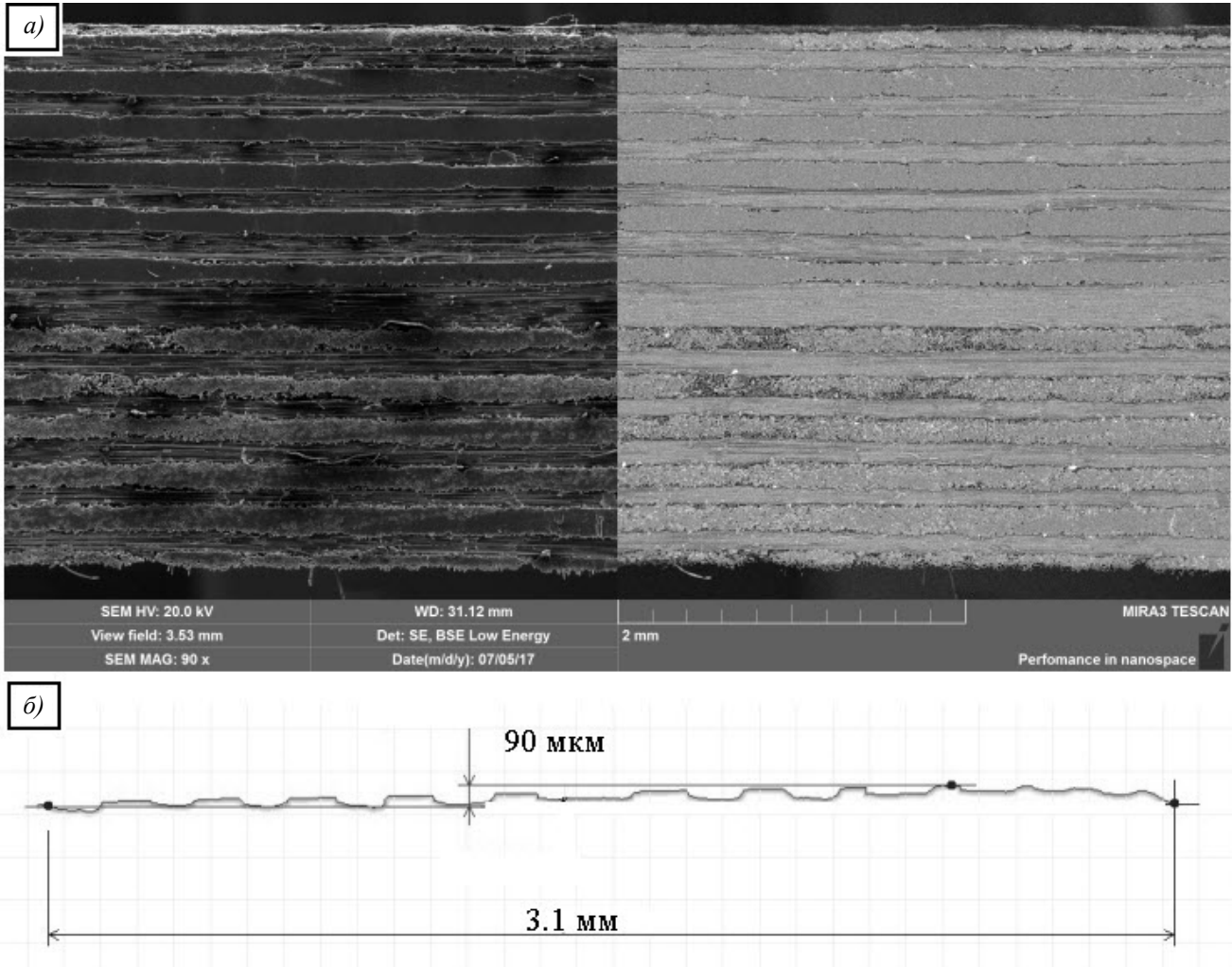


Рис. 5. Результаты обработки непрерывным лазером:

a – поверхность канала реза на электронном микроскопе; *б* – контур поверхности канала реза (конусность)

Механические испытания. Сравнительное исследование влияния способа обработки на качество детали проводилось путем механических испытаний образцов в соответствии со стандартом ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием». Для проведения физико-механических испытаний на растяжение каждым видом обработки было изготовлено по 5 конструктивно-подобных образцов из исследуемого углепластика толщиной 3 мм с диаметром сквозных отверстий 6, 8 и 16 мм.

Механическая обработка была проведена на специализированном обрабатывающем центре сверлами с алмазным покрытием серии

SandvikCoroDrill 854. Гидроабразивная резка осуществлялась на установке фирмы RESATOR при давлении 350 атм. Лазерная обработка осуществлялась на экспериментальной технологической установке с применением непрерывного волоконного лазера ЛК-1000-ОМ с определенными технологическими параметрами.

Испытания проводились на разрывной машине Tinius Olsen H1000KU при скорости движения траверсы 5 мм/мин в научно-исследовательской испытательной лаборатории НПЦ «НИАТ-Композит».

Для всех образцов тип разрушения идентифицируется как – сквозное по толщине в рабочей зоне посередине образца через концен-

тратор. Средние арифметические значения статической прочности показаны на диаграммах рис.6.

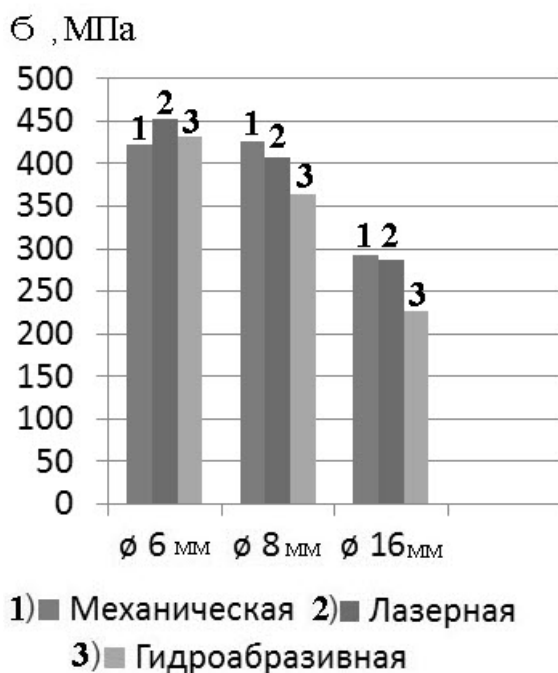


Рис. 6. Среднее арифметическое значение статической прочности образцов толщиной 3 мм при разных способах обработки и диаметрах отверстий 6, 8 и 16 мм

На основе полученных данных о прочности образцов можно сделать вывод, что механическая и лазерная обработки обеспечивают сопоставимый результат. При гидроабразивной обработке прочность ниже на 5...10 %, чем при других методах.

Заключение

В процессе выполнения настоящей работы на экспериментальной установке с применением отечественного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны излучения $\lambda = 1,06$ мкм разработана технология размерной обработки углепластиков толщиной 3 мм, обеспечивающая высокое качество детали – ЗТВ ≤ 150 мкм, конусность ≤ 100 мкм и скорость обработки до 1 м/мин.

Результаты сравнительных механических испытаний на растяжение образцов со сквозным отверстием показали, что лазерный способ обработки обеспечивает качество детали сопоставимое с традиционными методами. При этом отсутствие изнашиваемого инструмента и расходных материалов обеспечивает максимальную экономическую эффективность обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 720 стр.
2. Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 380 стр.
3. Находкин, П. А. “Черные крылья” готовятся к полетам //Авиаиндустрия: журн., 2011, №1, стр. 42-47.
4. Раскутин, А.Е., Хрульков, А.В., Гирш, Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016. №9. стр. 106-118.
5. Jamal Y. Sheikh-Ahmad Machining of Polymer Composites. Berlin, Springer, 2009. 315 p.
6. Панов, Д.В., Коротков, А.Н., Саушкин, Б.П. Композиты и станки для их обработки // РИТМ: спец. журн., 2014. №7. стр. 32-36.
7. Григорьянц, А.Г., Соколов, А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов. – М.: Высш. шк. 1988. – 191 с.
8. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюрлов, А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.
9. Вейко, В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.
10. Вакс, Е.Д., Миленский, М.Н., Сапрыкин, Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки, Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.
11. C. Leone, S. Genna, V. Tagliaferri Fibre laser cutting CFRP thin Sheets by multi-passes scan technique // Optics and Lasers in Engineering, 2014, v. 53, p. 43-50.
12. Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface // Physics Procedia, 2012, no. 39, pp. 161-170.
13. Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т.1. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
14. Гуреев, Д.М., Кузнецов, С.И., Петров, А.Л. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 1999. №2. стр. 255-264.

REFERENCES

1. Mikhailin, Yu.A. Fibrous polymer composites in engineering. – S-Pb.: *Scientific Fundamentals and Technologies*, 2015. – pp. 720.
2. Perepelkin, K.E. Reinforcing filaments and fibrous polymer composites. – S-Pb.: *Scientific Fundamentals and Technologies*, 2015. – pp. 380.
3. Nakhodkin, P.A. “Black Wings” prepare for flights // *Aviation Industry: journal*, 2011, No.1, pp. 42-47

4. Raskutin, A.E., Khrulkov, A.V., Girsh, R.I. Technological peculiarities of composite machining at manufacturing structure parts // *Proceedings of VIAM: electronic scientific-tech. journal*, 2016. No.9. pp. 106-118.

5. Jamal Y. Sheikh-Ahmad Machining of Polymer Composites. Berlin, Springer, 2009. 315 p.

6. Panov, D.V., Korotkov, A.N., Saushkin, B.P. *Composites and Machines for Their Machining* // Rhythm: special journal, 2014. No.7. pp. 32-36.

7. Grigoriyants, A.G., Sokolov, A.A. *Nonmetallic Material Laser Processing*. – М.: Higher School. 1988. – pp. 191.

8. Grigoriyants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Processing*. – М.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2008. – pp. 664.

9. Veiko, V.P. *Technological Lasers and Laser Emission* – S-Pb: S-PbSU ITMO, 2007. – pp. 52.

10. Wax, E.D., Milenky, M.N., Saprykin, L.G. Practice of Precision Laser Processing, Moscow: *Technosphere*, 2013. – pp. 696.

11. C. Leone, S. Genna, V. Tagliaferri, Fibre laser cutting CFRP thin Sheets by multi-passes scan technique // *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, v. 53, p. 43-50.

12. Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote Laser Cutting of CFRP: Improvements in the Cut Surface // *Physics Procedia*, 2012, no. 39, pp. 161-170.

13. Anufriev, V.I. Designer-Mechanist's Reference Book: in 3 Vol., Vol.1. – М.: *Mechanical Engineering*, 2001. – pp. 920.

14. Gureyev, D.M., Kuznetsov, S.I., Petrov, A.L. Carbon composite laser cutting // *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science*, 1999. No.2. pp. 255-264.

Рецензент д.ф.-м.н. М.А. Казарян

**ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЖУРНАЛА**

**«Научно-технические технологии в машиностроении»
объявляет подписку на 2018 год**

Подписной индекс **79195**
по объединенному каталогу
«Пресса России. Газеты и журналы»

Журнал выходит с 2011 г.

Почтовый адрес издательства:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7,

Редакция издания приглашает авторов публикаций к совместной работе.