

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕПЛАСТИКОВ ИМПУЛЬСНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

С.А. Котов<sup>1</sup>

skotov@ntoire-polus.ru

Н.А. Лябин<sup>2</sup>

В.В. Блинков<sup>3</sup>

vblinkov@niat.ru

Д.И. Кондратюк<sup>3</sup>

О.Б. Бибик<sup>1</sup>

obibik@ntoire-polus.ru

Д.С. Попов<sup>1</sup>

dpopov@ntoire-polus.ru

<sup>1</sup> Научно-техническое общество «ИРЭ-Полус», г. Фрязино, Московская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина», г. Фрязино, Московская обл., Российская Федерация

<sup>3</sup> Национальный институт авиационных технологий, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

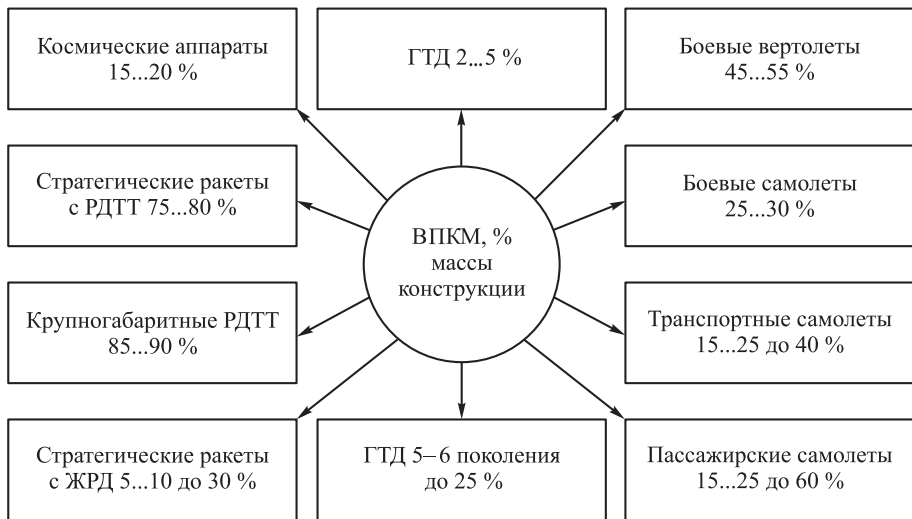
Проблема эффективной обработки изделий из углепластиков на основе термореактивных связующих благодаря высокому уровню их упругопрочностных свойств, многофункциональности и возможности обеспечения минимальной массы изделий сегодня весьма актуальна. Традиционные методы обработки (механическая и гидроабразивная) имеют ряд существенных недостатков — сильный износ режущего инструмента, расслоение материала из-за вибрационных и ударных нагрузок, ограничения на контур раскроя и др. В настоящее время лазерная обработка углепластиков — это наиболее перспективный бесконтактный, гибкий в управлении, производительный и не требующий расходных материалов способ обработки. Проведен большой объем экспериментальных исследований в целях определения технологических параметров лазерной обработки углепластиков толщиной 1 мм с матрицей на основе эпоксидной смолы для обеспечения приемлемой зоны термического влияния и геометрии канала реза. Создана установка на основе широко применяемого в современной промышленности наносекундного импульсного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1,06 мкм и средней мощностью излучения 20 Вт. Разработана методика оценки качества обработки. По результатам исследований сформулированы рекомендации по выбору алгоритма и технологических параметров режима обработки, обеспечивающих требуемое качество детали в соответствии с установленными критериями

### Ключевые слова

*Импульсный волоконный иттербиевый лазер, лазерная обработка, зона термического влияния, полимерные композиционные материалы, углепластики*

Поступила в редакцию 23.06.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

**Введение.** Углепластики являются волокнистыми полимерными композиционными материалами (ВПКМ), в которых в качестве наполнителя используются углеродные и графитизированные волокна, нити, ленты, ткани различной текстуры, а в качестве связующей матрицы — термореактивные или термопластичные пластики на основе эпоксидных, имидных, фенольных и других смол. Углепластики относятся к ключевым материалам для легковесных конструкций, все более широко применяемым в авиации, автомобилестроении, ракетостроении, машиностроении, производстве космической и медицинской техники и т. д. Их использование дает значительный экономический эффект. Например, в летательных аппаратах достигается снижение массы от 10 до 30 %. Кроме низкой плотности, к уникальным эксплуатационным свойствам углепластиков относятся высокие прочность и упругость, статическая и динамическая выносливость, усталостная прочность, термостойкость, химическая стойкость, огнестойкость и др. Оценочные значения объема использования ВПКМ в конструкциях авиакосмической техники показаны на рис. 1 [1].



**Рис. 1.** Доля использования ВПКМ в авиакосмической отрасли (% масс.)

При производстве изделий из ВПКМ на финальном этапе изготовления применяют контурную резку и сверление сквозных отверстий для крепежных элементов. Эти операции выполняются механической обработкой режущим инструментом, а также гидроабразивной и лазерной обработкой. Сравнительный анализ характеристик данных способов обработки приведен в работе [2], из которого следует, что высокая производительность, отсутствие механического воздействия на материал и износа инструмента характеризуют лазерную обработку ВПКМ волоконными лазерами мульткиловаттного диапазона (в импульсном или непрерывном режимах работы) как одно из перспективных направлений без недостатков традиционных способов обработки.

Основные факторы, влияющие на итоговое качество детали при лазерной обработке, подробно рассмотрены в работе [3].

Лазерная обработка ВПКМ в настоящее время уже хорошо установившаяся и многообещающая технология, но из-за неоднородных теплофизических свойств материала возникают проблемы по качеству обработки. Главная технологическая проблема — образование зоны термического влияния (ЗТВ), в которой нарушается прочность сцепления углеродных волокон наполнителя со связующей матрицей, что приводит к снижению упругопрочностных свойств ВПКМ. Зона термического влияния возникает вследствие того, что из-за высокой теплопроводности углеродного волокна (на 1–2 порядка больше, чем у матрицы) и низкой температуры повреждения матрицы (на порядок ниже, чем температура испарения углеродного волокна) часть энергии лазерного излучения рассеивается в материале вне канала реза, вызывая термодеструкцию матрицы. Поэтому для достижения высокого качества лазерной обработки ВПКМ необходим комплекс экспериментальных и теоретических исследований по определению алгоритма и технологических параметров режима обработки.

**Экспериментальная установка.** Экспериментальные исследования по лазерной обработке углепластиков проводились на установке, состоящей из следующих комплектующих:

- импульсного наносекундного иттербиевого волоконного лазера модели YLPM-1-4×200-20-20 с длиной волны излучения 1,06 мкм и средней мощностью 20 Вт производства НТО «ИРЭ-Полюс». Типовые режимы работы данного лазера показаны в табл. 1;

- двухосевого гальваносканера с входной апертурой 10 мм и типовой скоростью сканирования 3 м/с;

- F-Theta-линзы с фокусным расстоянием  $f = 100$  мм и размером поля обработки  $62 \times 62$  мм;

- модуля линейного перемещения сканирующей системы по вертикальной оси  $Z$  с точностью позиционирования 25 мкм, повторяемостью  $\pm 25$  мкм;

- контроллера, управляющего импульсным волоконным лазером, гальваносканером и сервоприводом по оси  $Z$ , со специализированным программным обеспечением.

Таблица 1

**Параметры типовых режимов работы иттербиевого волоконного лазера модели YLPM-1-4×200-20-20**

Обозначение режима работы лазера	Средняя выходная мощность, Вт	Частота следования импульсов, кГц	Длительность импульса (по высоте), нс	Энергия в импульсе, мДж
$T_8$	20	20	200	1,0
$T_7$		40	100	0,5
$T_6$		60	50	0,33
$T_5$		85	30	0,23
$T_4$		105	20	0,19
$T_3$		125	14	0,16
$T_2$		200	8	0,1
$T_1$		500	4	0,04

В работе в качестве исследуемого материала использовался углепластик марки M21/35%/134/T700/300 толщиной 1 мм, изготовленный методом прямого прессования. В данном материале в качестве армирующего волокнистого наполнителя (АВН) используется углеровинг T700S фирмы *Toray* с диаметром волокна 7 мкм и связующая матрица на основе эпоксидных смол марки M21 фирмы *Hexcel*. Массовое содержание АВН в материале составляет 65 %. Применяемый углепластик состоит из восьми слоев, схема армирования —  $(0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ , его структура схематично изображена на рис. 2 [4].

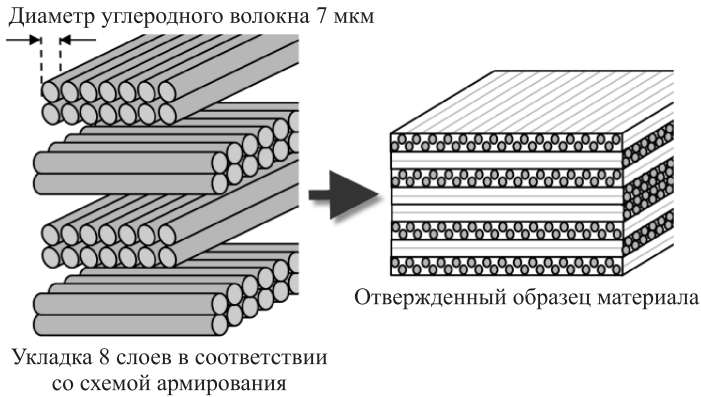


Рис. 2. Структура исследуемого углепластика

Типовые теплофизические свойства связующей матрицы на основе эпоксидной смолы и АВН углепластика приведены в табл. 2 [5].

Таблица 2

**Теплофизические параметры материала матрицы и АВН углепластика**

Параметр	Матрица	Волокно (параллельно / перпендикулярно оси волокна)
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1250	1850
Теплопроводность $\kappa$ , Вт/(м · К)	0,2	50/5
Теплоемкость $c_p$ , Дж/(кг · К)	1200	710
Температура диспергирования / испарения $T_n$ , К	800	3900
Энергия активации процесса термодеструкции / скрытая теплота испарения $L_n$ , кДж/кг	1000	43000
Температура повреждения структуры, К	450	3000
Коэффициент поглощения излучения при падении под прямым углом $A$ , %	Нет данных	83,7 / 58,4

Экспериментальный стенд смонтирован на алюминиевой оптической плите, установленной на четырех виброопорах. Оптическая сканирующая система закреплена на вертикальной моторизованной оси  $Z$  в целях обеспечения возможности смещения положения плоскости фокусировки во время обработки.

Выбор модели лазера и оптической системы был обусловлен необходимостью обеспечения высокой плотности мощности в сфокусированном пятне излучения и короткого времени взаимодействия лазерного излучения с веществом для снижения эффекта накопления теплоты в материале. Так, в работе [6] показано, что для уменьшения ширины ЗТВ до менее 100 мкм необходимо иметь плотность мощности лазерного излучения не менее  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, в [7] приводится оценка пороговой плотности мощности  $q^{\text{пор}}$ , необходимой для импульсного нагрева поверхности до температуры испарения  $T_{\text{и}}$  (см. табл. 2), по формуле

$$q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T_{\text{и}} - T_{\text{н}}) \kappa \sqrt{\pi}}{2A \sqrt{\chi \tau}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{н}}$  — начальная температура материала;  $\kappa$  — теплопроводность углеродного волокна;  $A$  — коэффициент поглощения излучения АВН;  $\chi$  — коэффициент температуропроводности АВН;  $\tau$  — длительность импульса излучения. Расчет показал, что с учетом параметров источника излучения (см. табл. 1) необходимо обеспечить уровень плотности мощности не менее  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Диаметр сфокусированного пятна излучения обеспечиваемый экспериментальной установкой, определяется по формуле [8]:

$$d = \frac{4\lambda}{\pi D} M^2 f, \quad (2)$$

где  $\lambda = 1,06$  мкм — длина волны падающего излучения;  $D = 7,8$  мм — диаметр коллимированного пучка по уровню  $1/e^2$ ;  $M^2 = 1,76$  — параметр качества пучка;  $f = 100$  мм — фокусное расстояние объектива. При этом глубина фокуса (длина перетяжки) составляет

$$2z = \frac{\pi d^2}{4\lambda}. \quad (3)$$

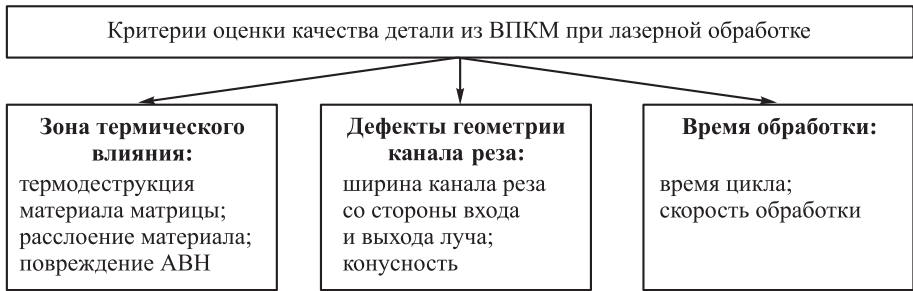
В результате получаем:  $d = 30$  мкм,  $2z = 1,4$  мм.

Плотность мощности излучения в фокусе можно найти как

$$W_{\text{имп}} = \frac{P_{\text{ср}}}{f_{\text{имп}} \tau_{\text{имп}} S}, \quad (4)$$

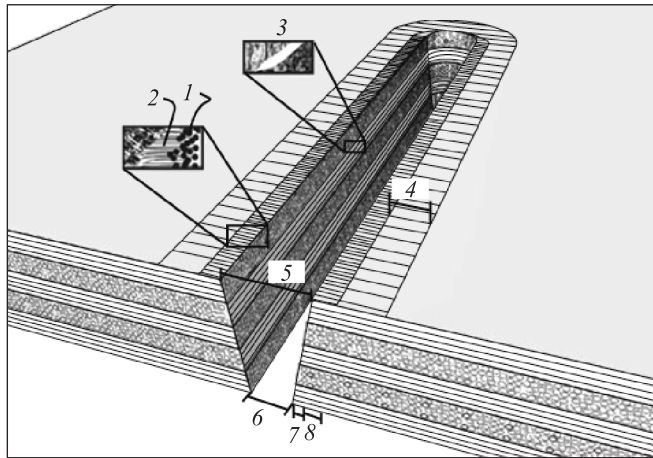
где  $P_{\text{ср}}$  — средняя мощность лазерного излучения;  $f_{\text{имп}}$  — частота следования импульсов;  $\tau_{\text{имп}}$  — длительность импульсов;  $S$  — площадь сфокусированного пятна. Расчет показал, что во всех режимах работы лазера плотность мощности находится на уровне  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Такой плотности мощности излучения, обеспечиваемой экспериментальной установкой, достаточно для высококачественной обработки углепластиков.

**Методика оценки качества обработки.** Факторы, определяющие качество детали из ВПКМ при лазерной обработке, делятся на три категории [2, 9]. На рис. 3 приведено их описание.



**Рис. 3.** Критерии оценки качества детали из ВПКМ при лазерной обработке

На рис. 4 схематично изображен канал реза, показаны ЗТВ и дефекты геометрии канала реза. Ширина  $W_{зТВ}$  ЗТВ вычисляется как  $W_{зТВ} = S_{зТВ} / L_{реза}$ , где  $S_{зТВ}$  — площадь поврежденной области, ограниченной длиной реза  $L_{реза}$ .



**Рис. 4.** Типовые дефекты, наблюдаемые при лазерной обработке ВПКМ:

1 — повреждение АВН; 2 (7) и 4 (8) — зоны полной и частичной (наличие цветов побежалости) термодеструкции матрицы со стороны входа (выхода) луча; 3 — расслоение материала; 5 и 6 — ширина канала реза со стороны входа и выхода луча

На основе указанных критериев оценки ЗТВ в работах [9, 10] предложено определять три класса качества деталей при лазерной обработке ВПКМ.

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

2. Класс В (удовлетворительное качество):  $50 \leq W_{зТВ} \leq 150$  мкм, допускается видимое тепловое повреждение материала матрицы.

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

Оценка ширины канала реза и ЗТВ на поверхности образца со стороны входа и выхода луча проводилась с помощью оптического микроскопа Olympus

GX-51. Внутренние дефекты (расслоение материала, повреждение матрицы, образование пор) исследовали на микрошлифе поперечного сечения канала реза этим же микроскопом. Поперечный профиль поверхности канала реза измеряли контурографом Mitutoyo Contracer CV-2100. Наличие дефектов (повреждение АВН, термодеструкция матрицы, трещины, поры) поверхности канала определяли на электронном сканирующем микроскопе ZEISS GEMINI MERLIN COMPACT VP-60-13.

**Результаты экспериментальных исследований по обработке углепластиков.** Из [5, 11–13] известно, что при нормальных условиях окружающей среды лазерная обработка углепластиков происходит за счет механизма испарения. В нашей работе резка осуществляется в многопроходном режиме по прямой линии длиной 30 мм без подачи технологического газа и пауз между проходами.

Поскольку скорость сканирования оказывает значительное влияние на качество детали, то в первой серии экспериментов для каждого режима работы лазера была определена рекомендуемая скорость. При этом положение фокуса линзы было установлено на лицевой поверхности образца и во время обработки не смещалось.

Во всех режимах при скорости сканирования менее 0,5 м/с ширина зоны полной термодеструкции матрицы составила более 150 мкм. Это связано с тем [8], что во время обработки вблизи поверхности детали образуется факел из частиц материала с различным фазовым состоянием. Вследствие многократного наложения импульсов в нем происходит рефракция излучения, что приводит к увеличению ЗТВ. При скорости порядка 1 м/с качество детали соответствовало классам А и В. При увеличении скорости сканирования более 1 м/с ЗТВ не менялась, но возрастало время обработки. Ширина канала реза при выбранном алгоритме обработки составляла примерно 40 мкм, поэтому при глубине канала реза более 700 мкм (половина глубины фокуса) часть энергии импульса поглощалась стенками канала реза из-за эффекта расхождения лазерного излучения. Данный эффект приводит к увеличению ЗТВ и снижает эффективность обработки.

Во второй серии экспериментов с целью ограничить влияние этого эффекта был применен алгоритм раскроя по нескольким параллельным линиям за один проход (штриховка) со смещением положения фокуса во время обработки, он схематично изображен на рис. 5.

По результатам второй серии экспериментов были определены рекомендуемые параметры алгоритма обработки: расстояние штриховки, число параллельных линий, шаг смещения положения фокуса и общее число проходов, обеспечивающие качество детали не хуже класса В, полный рез и приемлемую геометрию канала реза — конусность не более 50 мкм. Оптимальное качество обработки углепластика по критериям ширины ЗТВ, геометрии канала реза и времени обработки было получено при работе лазера в режиме  $T_6$ . Результаты обработки в этом режиме показаны на рис. 6 и 7.

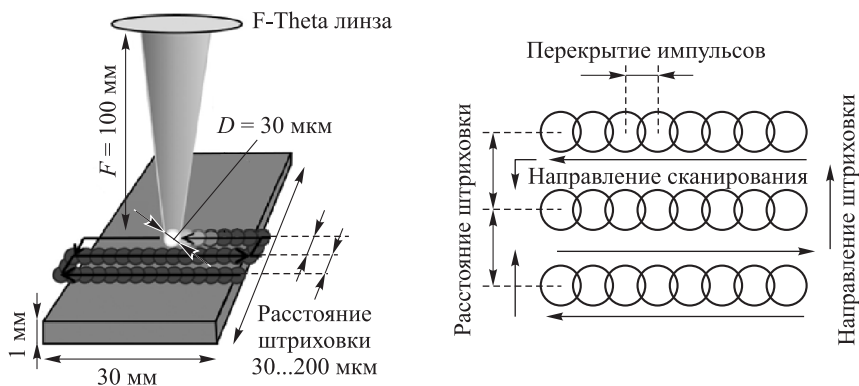


Рис. 5. Алгоритм обработки по нескольким параллельным линиям за один проход

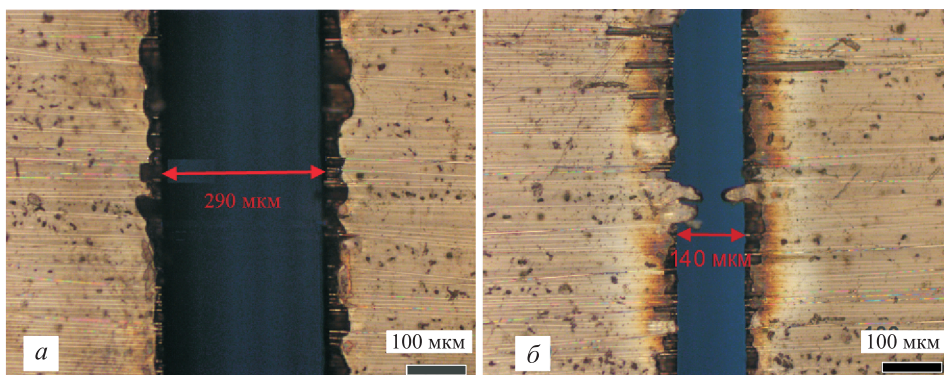


Рис. 6. Поверхность детали со стороны входа (а) и выхода (б) луча

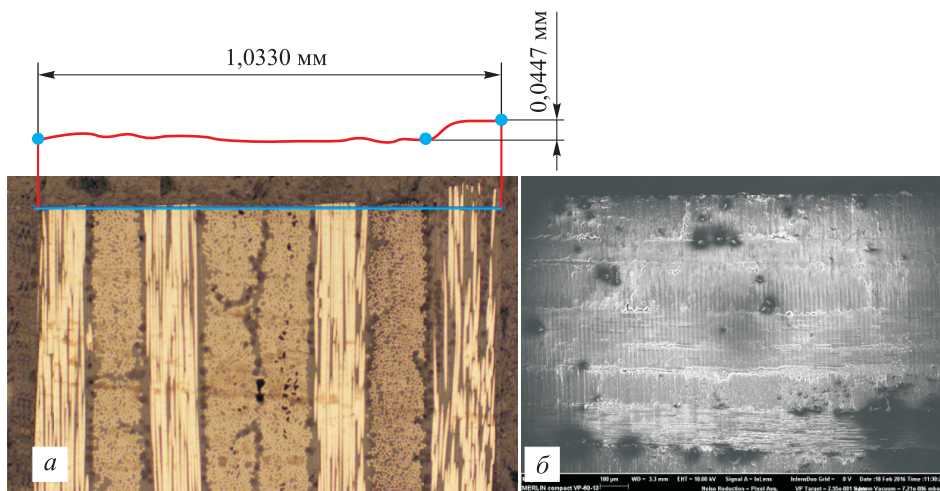


Рис. 7. Микрошлиф поперечного сечения (а) и результат измерения поперечного профиля поверхности канала реза (б)



При этом ширина канала реза со стороны входа и выхода луча составила соответственно 290 и 140 мкм. Со стороны входа луча ширина зоны с полной термодеструкцией матрицы составила 50...60 мкм, зона с частичной термодеструкцией отсутствует. Со стороны выхода луча ширина зоны с полной термодеструкцией матрицы составила менее 50 мкм, присутствует зона с частичной термодеструкцией матрицы.

Из рис. 7 следует, что такие повреждения структуры материала, как расслоение, термодеструкция матрицы и поры отсутствуют. Анализ изображения поверхности канала реза, полученного с помощью электронного микроскопа, показал также отсутствие повреждений АВН, трещин и расслоения материала. Поперечный профиль стенки канала измеряли по длине реза (30 мм) в пяти параллельных плоскостях. Среднее значение конусности канала реза составило 50 мкм.

**Основные выводы.** Разработана экспериментальная установка на базе импульсного наносекундного волоконного лазера модели YLPM-1-4×200-20-20 с длиной волны 1,06 мкм и средней мощностью излучения 20 Вт.

На созданной установке отработана технология лазерной обработки углепластиков толщиной 1 мм с матрицей на основе эпоксидной смолы. При рекомендуемых алгоритме и технологических параметрах лазерной обработки в режиме  $T_6$  обеспечивается требуемое качество деталей: ЗТВ соответствует классу В; конусность стенки канала реза не превышает 50 мкм; на поперечном сечении и поверхности канала реза такие дефекты, как расслоение материала и термодеструкция матрицы отсутствуют.

В режиме работы лазера  $T_1$  качество детали по критерию ЗТВ соответствует более высокому классу А, однако при этом конусность канала реза составляет более 150 мкм и время обработки увеличивается на порядок по сравнению с рекомендуемым режимом  $T_6$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2015. 720 с.
2. Negarestani R., Li L. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials // Machining technology for composite materials. Principles and practice. Woodhead Publishing Ltd., 2012. P. 288–308.
3. Goeke A., Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. Part B. P. 253–258. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.051 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210004773>
4. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser / K. Takahashi, M. Tsukamoto, S. Masuno, Y. Sato, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, M. Fujita, H. Ogata // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 222. P. 110–121. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.043 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615001004>
5. Weber R., Hafner M., Michalowski A., Graf T. Minimum damage in CFRP laser processing // Physics Procedia. 2011. Vol. 12. Part B. P. 302–307. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.137 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211002161>

6. *Short-pulse laser processing of CFRP* / R. Weber, C. Freitag, T. Kononenko, M. Hafner, V. Onuseit, P. Berger, T. Graf // *Physics Procedia*. 2012. Vol. 39. P. 137–146.  
DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.023  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025503>
7. *Вейко В.П.* Технологические лазеры и лазерное излучение // Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 52 с.
8. *Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г.* Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
9. *Leone C., Genna S., Tagliaferri V.* Fibre laser cutting CFRP thin Sheets by multi-passes scan technique // *Optics and Lasers in Engineering*. 2014. Vol. 53. P. 43–50.  
DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.027 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002431>
10. *Cenna A., Mathew P.* Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics — a review // *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 1997. Vol. 37. No. 6. P. 723–736.
11. *Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics* / M. Canisius, D. Herzog, M. Schmidt–Lehr, M. Oberlander, F. Albert, S. Broetje, P. Ploog, C. Emmelmann // *NAFEMS Seminar “Simulation of Composites — A Closed Process Chain?”*, Leipzig, 2014. URL: [http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems\\_simulation\\_of\\_composites.pdf](http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf) (дата обращения: 17.05.2016).
12. *Гуреев Д.М., Кузнецов С.И., Петров А.Л.* Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // *Известия Самарского научного центра РАН*. 1999. № 2. С. 255–264.
13. *Григорьянц А.Г., Соколов А.А.* Лазерная обработка неметаллических материалов. Кн. 4. М.: Высш. шк., 1988. 191 с.

**Котов Сергей Александрович** — ведущий инженер НТО «ИРЭ-Полюс» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. имени академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3).

**Лябин Николай Александрович** — д-р техн. наук, начальник лаборатории АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., д. 2а).

**Блинков Владимир Викторович** — канд. техн. наук, начальник лаборатории Национального института авиационных технологий (Российская Федерация, 117587, Москва, Кировоградская ул., д. 3).

**Кондратюк Дмитрий Иванович** — старший научный сотрудник Национального института авиационных технологий (Российская Федерация, 117587, Москва, Кировоградская ул., д. 3).

**Бибик Олег Борисович** — канд. техн. наук, инженер НТО «ИРЭ-Полюс» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. имени академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3).

**Попов Дмитрий Сергеевич** — инженер НТО «ИРЭ-Полюс» (Российская Федерация, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. имени академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Котов С.А., Лябин Н.А., Блинков В.В., Кондратюк Д.И., Бибик О.Б., Попов Д.С. Экспериментальная оценка режимов размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 1. С. 73–85. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-73-85

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS MACHINING MODES BY NANOSECOND PULSED YTTERBIUM FIBER LASER**

**S.A. Kotov<sup>1</sup>**

skotov@ntoire-polus.ru

**N.A. Lyabin<sup>2</sup>**

**V.V. Blinkov<sup>3</sup>**

vblinkov@niat.ru

**D.I. Kondratyuk<sup>3</sup>**

**O.B. Bibik<sup>1</sup>**

obibik@ntoire-polus.ru

**D.S. Popov<sup>1</sup>**

dpopov@ntoire-polus.ru

<sup>1</sup> Science and Technical Association IRE-Polus, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC RPC Istok named after Shokin, Fryazino, Moscow Region, Russian Federation

<sup>3</sup> National Institute of Aviation Technologies, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

The study tested the problem of effective machining of products made of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) based on thermosetting binders due to the high level of their strength properties, versatility and ability to provide the minimum product weight. This issue has become relevant at present time. Traditional machining methods (mechanical and hydro-abrasive machining) have some significant disadvantages — high tool wear, material delamination due to the vibration and shock loadings, limitations on the cutting contour and others. One of the most promising solutions for eliminating these problems in conventional methods is CFRP laser machining, as it is a non-contact, flexible in operation, efficient machining method. We conducted experimental research to determine the process variables of laser machining of 1 mm thick CFRP with epoxy resins matrix for acceptable heat affected zone (HAZ) and cut channel geometry. We built a set-up on the basis of a widely used in modern industry nanosecond pulsed ytterbium fiber laser with a wavelength of 1.06 microns and an average output power of 20 watts. We developed a method for evaluating the quality of machining. According to the research results, we formulated recommendations on the choice of algorithm and process variables of the machining conditions, providing the required quality of the parts in accordance with the established criteria

**Keywords**

*Pulsed ytterbium fiber laser, laser treatment, heat affected zone, polymer composites, carbon fiber reinforced plastics*

## REFERENCES

- [1] Mikhaylin Yu.A. Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike [Fiber polymer composite materials in engineering]. Sankt-Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2015. 720 p.
- [2] Negarestani R., Li L. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials. In: Machining technology for composite materials. Principles and practice. Woodhead Publishing Ltd., 2012. P. 288–308.
- [3] Goeke A., Emmelmann S. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, part B, pp. 253–258. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.051  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389210004773>
- [4] Takahashi K., Tsukamoto M., Masuno S., Sato Y., Yoshida H., Tsubakimoto K., Fujita H., Miyanaga N., Fujita M., Ogata H. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 222, pp. 110–121. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.043 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615001004>
- [5] Weber R., Hafner M., Michalowski A., Graf T. Minimum damage in CFRP laser processing. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, part B, pp. 302–307. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.137  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211002161>
- [6] Weber R., Freitag C., Kononenko T., Hafner M., Onuseit V., Berger P., Graf T. Short-pulse laser processing of CFRP. *Physics Procedia*, 2012, vol. 39, pp. 137–146. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.023  
Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212025503>
- [7] Veyko V.P. Tekhnologicheskie lazery i lazernoe izluchenie. Opornyy konspekt lektsiy po kursu “Fiziko-tekhnicheskie osnovy lazernykh tekhnologiy” [Technological lasers and laser emission. In: Supportive lecture notes on course: “Physics-technical principles of laser technologies”]. Sankt-Petersburg, SPbGU ITMO Publ., 2007. 52 p.
- [8] Vaks E.D., Milen'kiy M.N., Saprykin L.G. Praktika pretsizionnoy lazernoy obrabotki [Practice of precision laser work]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013. 696 p.
- [9] Leone S., Genna S., Tagliaferri V. Fibre laser cutting CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, vol. 53, pp. 43–50.  
DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.027 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002431>
- [10] Cenna A., Mathew R. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics — a review. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1997, vol. 37, no. 6, pp. 723–736.
- [11] Canisius M., Herzog D., Schmidt-Lehr D., Oberlander M., Albert F., Broetje S., Ploog R., Emmelmann S. Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics. *NAFEMS Seminar “Simulation of Composites — A Closed Process Chain?”*. Leipzig, 2014. Available at: [http://www.scanson.de/files/publikationen/nafems\\_simulation\\_of\\_composites.pdf](http://www.scanson.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf) (accessed 17.12.16).
- [12] Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Laser cutting of carbon composites. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 1999, no. 2, pp. 255–264 (in Russ.).
- [13] Grigor'yants A.G., Sokolov A.A. Lazernaya obrabotka nemetallicheskih materialov. Kniga 4 [Laser work of nonmetallic materials. Vol. 4]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 191 p.

**Kotov S.A.** — Leading engineer in Science and Technical Association IRE-Polus (pl. Akademiya Vvedenskogo 1, str. 3, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Lyabin N.A.** — Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory in JSC RPC Istok named after Shokin (Vokzal'naya ul. 2a, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Blinkov V.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory in National Institute of Aviation Technologies (Kirovogradskaya ul. 3, Moscow, 117587 Russian Federation).

**Kondratyuk D.I.** — Senior Research Scientist in National Institute of Aviation Technologies (Kirovogradskaya ul. 3, Moscow, 117587 Russian Federation).

**Bibik O.B.** — Cand. Sci. (Eng.), engineer in Science and Technical Association IRE-Polus (pl. Akademiya Vvedenskogo 1, str. 3, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Popov D.S.** — engineer in Science and Technical Association IRE-Polus (pl. Akademiya Vvedenskogo 1, str. 3, Fryazino, Moscow Region, 141190 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kotov S.A., Lyabin N.A., Blinkov V.V., Kondratyuk D.A., Bibik O.B., Popov D.S. Experimental Evaluation of Carbon Fiber Reinforced Plastics Machining Modes by Nanosecond Pulsed Ytterbium Fiber Laser. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 1, pp. 73–85.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-73-85



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие авторов  
**Е.А. Власовой, В.С. Зарубина, Г.Н. Кувыркина**  
«**Математические модели процессов  
теплопроводности**»

Изложены сведения, составляющие содержание раздела «Математические модели тепловых систем» курса «Математические модели технических систем». Приведены примеры решения задач, а также контрольные вопросы и задачи для самостоятельной работы студентов. Часть задач может служить основой для проведения студентами самостоятельной научно-исследовательской работы.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
+7 (499) 263-60-45  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru