

Статья поступила в редакцию 27.02.18. Ред. рег. № 2644

The article has entered in publishing office 27.02.18. Ed. reg. No. 2644

УДК 621.9.044, 621.373.8

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ\*

*С.А. Котов<sup>1</sup>, Н.А. Лябин<sup>2</sup>, М.А. Казарян<sup>3</sup>, В.И. Сачков<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>ООО «НТО ИРЭ-Полус»

стр. 3, д. 1, пл. Академика Введенского, Фрязино, Московская область, 141190, Россия  
тел.: +7 (495) 702-95-89; e-mail: skotov@ntoire-polus.ru

<sup>2</sup>АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина»

д. 2а, ул. Вокзальная, Фрязино, Московская область, 141190, Россия  
тел.: +7 (495) 465-86-66; e-mail: lilt@istokmw.ru

<sup>3</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН  
д. 53, Ленинский проспект, Москва, 119991, Россия  
тел.: +7 (499) 135-42-64; e-mail: postmaster@lebedev.ru

<sup>4</sup>Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова, Томский государственный университет  
д. 1, Новособорная пл., Томск, 634050, Россия  
тел.: +7 (3822) 53-35-77; e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104

Заключение совета рецензентов: 05.03.18 Заключение совета экспертов: 15.03.18 Принято к публикации: 23.03.18

Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в таких ключевых отраслях современной промышленности, как ветро- и гидроэнергетика, авиа- и машиностроение и др., благодаря высокому уровню их упругопрочностных свойств, многофункциональности, экологичности и возможности обеспечения минимальной массы изделий, ставит проблему эффективной обработки этих материалов. Традиционные методы обработки (механическая и гидроабразивная) обладают рядом существенных недостатков: сильный износ режущего инструмента; расслоение материала из-за вибрационных и ударных нагрузок; ограничения на контур раскроя и т.д. В статье рассматривалась лазерная обработка ПКМ, которая в настоящее время считается наиболее перспективным бесконтактным, гибким в управлении, производительным и не требующим расходных материалов способом обработки. В ходе анализа теоретических и экспериментальных отечественных и зарубежных работ установлено, что перспективным направлением для качественной и производительной обработки ПКМ является применение промышленных волоконных иттербиевых лазеров. Результаты исследований с помощью экспериментальных технологических установок на базе наносекундных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров с мощностью излучения до 1 кВт и оптических двухосевых гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой со скоростью перемещения луча до 20 м/с показали, что метод лазерной многопроходной обработки ПКМ с послойным удалением (абляцией) материала за счет механизма испарения позволяет осуществлять высококачественную прецизионную резку и сверление стекло- и углепластиков толщиной 1–3 мм.

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

\*Котов С.А., Лябин Н.А., Казарян М.А., Сачков В.И. Современные полимерные композиционные материалы и возможности их лазерной обработки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(10-12):82-104.

## MODERN POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND POSSIBILITIES OF THEIR LASER MACHINING

S.A. Kotov<sup>1</sup>, N.A. Lyabin<sup>2</sup>, M. A. Kazarian<sup>3</sup>, V.I. Sachkov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IRE-Polus Co.

1 Academician Vvedenskii Sq., Fryazino, Moscow reg., 141190, Russia  
tel.: +7 (495) 702 95 89, e-mail: skotov@ntoire-polus.ru

<sup>2</sup>JSC RPE "ISTOK" n. a. Shokin

2a Vokzalnaya St., Fryazino, Moscow region, 141190, Russia  
tel.: +7 (495) 465 86 66, e-mail: lilt@istokmw.ru

<sup>3</sup>The P. N. Lebedev Physical Institute

53 Leninskiy Av., Moscow, 119991, Russia  
tel.: +7 (499) 135 42 64, e-mail: postmaster@lebedev.ru

<sup>4</sup>SFTI, Tomsk State University

1 Novosobornaya Sq., Tomsk, 634050, Russia  
tel.: +7 (3822) 53 35 77, e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.10-12.082-104

Referred 5 March 2018 Received in revised form 15 March 2018 Accepted 23 March 2018



The widespread introduction of polymer composite materials in key sectors of modern industry such as wind and hydropower engineering, aircraft and machinery ones, etc. due to the high level of their strength properties, versatility and ability to provide the lowest weight of parts of products raises the problem of their processing. Traditional processing methods (mechanical and abrasive water jet machining) have some significant shortcomings: high tool wear, delamination due to vibration and shock loadings, limitations on the cutting contour and others. The paper deals with the polymer composites laser machining which is considered to be one of the promising solutions for elimination of conventional methods disadvantages due to a contact-free, flexible and high-performance processing method. As a result of analysis of theoretical and experimental domestic and foreign works, the use of industrial ytterbium fiber lasers are found to be a promising direction for high-quality and productive processing of polymer composite materials. The results of studies using the experimental technological setups on the basis of nanosecond pulsed and continuous ytterbium fiber lasers with a radiation power up to 1 kW and optical scanning systems based on the biaxial galvo scanners and focusing F-Theta lenses with beam travel speeds up to 20 m / s have shown that the laser multi-pass machining of polymer composite materials with layer-by-layer removal (ablation) of the material due to the evaporation mechanism allows for precise and high quality cutting and drilling of carbon and glass fiber reinforced plastics and carbon plastics with a thickness 1–3 mm.

Keywords: polymer composite materials, glass fiber reinforced plastics, carbon fiber reinforced plastics, ytterbium fiber laser, laser machining, heat affected zone.



Николай Александрович  
Лябин  
Nikolay Lyabin

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, начальник лаборатории АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина».

**Образование:** Мордовский государственный университет (1972 г.).

**Область научных интересов:** лазеры; лазерные системы и их применение в науке, технике, медицине; физическая оптика; лазерное технологическое оборудование и технология обработки материалов.

**Публикации:** 150.  
*h*-index: 8

**Information about the author:** D.Sc. in Engineering, Head of Laboratory, Joint-Stock Company Research & Production Corporation "ISTOK" named after A.I. Shokin.

**Education:** Mordovia State University, 1972.

**Research interests:** lasers; laser systems and their applications in science, technology, medicine; physical optics; laser processing equipment and material processing technology.

**Publications:** 150.



Мишик Айразатович  
Казарян  
Mishik Kazaryan

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

**Образование:** Московский физико-технический институт (1970 г.).

**Область научных интересов:** физика лазеров и их применение; физическая оптика.

**Публикации:** 600.  
*h*-index: 12

**Information about the author:** D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Physical Institute named after P. N. Lebedev RAS.

**Education:** Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

**Research interests:** laser machining of composite materials

**Publications:** 600.



*Виктор Иванович Сачков*  
Viktor Sachkov

**Сведения об авторе:** д-р хим. наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет.

**Образование:** Томский государственный университет (1995 г.).

**Область научных интересов:** лазерная технология; нанотехнологии; химическая кинетика.

**Публикации:** 120.  
*h*-index: 4

**Information about the author:** D.Sc. in Chemistry, Head of Laboratory, Tomsk State University.

**Education:** Tomsk State University, 1995.

**Research interests:** laser technology; nanotechnology; chemical kinetics.

**Publications:** 120.



*Сергей Александрович Котов*  
Sergey Kotov

**Сведения об авторе:** инженер, ООО «НТО ИРЭ-Полус».

**Образование:** Московский энергетический институт (2011 г.).

**Область научных интересов:** лазерная обработка композиционных материалов.

**Публикации:** 8.

**Information about the author:** Engineer, IRE-Polus.

**Education:** MPEI, 2011.

**Research interests:** laser machining of composite materials.

**Publications:** 8.

## 1. Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря уникальному комплексу технологических и эксплуатационных свойств являются классом материалов, определяющим развитие современных ветро- и гидроэнергетических установок, экологически чистого транспорта на электротяге, авиакосмических аппаратов и др. [1, 2]. Наиболее перспективным типом ПКМ, обладающим высокой технологичностью и регулируемыми конструкционными свойствами, являются волокнистые ПКМ. Требуемый уровень конструкционных свойств этих ПКМ обеспечивается сочетанием высокопрочных волокон (нити, ленты, ткани различной текстуры) с терморезактивными и

термопластичными связующими матрицами на основе эпоксидных, винилэфирных, фенолоальдегидных, имидных и других смол. Химическая природа волокнистых наполнителей определяет основной ассортимент ПКМ: стекло-, органо- и углепластики [3].

Применение ПКМ в современной технике позволяет снизить вес, трудоемкость изготовления и увеличить износостойкость конструкций, что значительно повышает экономическую эффективность конечного изделия [4, 5]. В известных зарубежных компаниях, таких как Gamesa, Vesta Wind Systems и Enercon, производящих ветрогенераторы, ПКМ широко применяются при производстве лопастей турбин длиной до 60 м. Внешний вид лопастей для ветроэнергетических установок представлен на рис. 1 [1].



**Рис. 1** – Лопасти ветроэнергетических установок из углепластиков  
**Fig. 1** – Blades of wind power plants from carbon fiber reinforced plastics



Среди ПКМ, лидирующие позиции занимают углепластики, существенно превосходящие традиционные стали, алюминиевые и титановые сплавы по удельной прочности и жесткости, усталостной и длительной прочности, возможностям регулировки анизотропии свойств, широкому комплексу тепло- и электрофизических характеристик, многофункциональности применения [6]. В большинстве конструкций ветро- и гидроэнергетических установок и электрического транспорта из ПКМ используют угле- и стеклопластики на основе модифицированных эпоксидных матриц с оптимизированными параметрами теплостойкости, огнестойкости, трещиностойкости и водопоглощения. Производство элементов конструкций из углепластика и других типов ПКМ в значительной степени ориентируется на препреговую технологию, которая предполагает применение высококачественных полуфабрикатов для изделий, получаемых с помощью технологий прессования, вакуумного и автоклавного формования и др.

Отечественная и зарубежная практика [6–11] показала, что использование углепластиков целесообразно в энергетике – для лопастей и опор ветро- и гидроэнергетических установок; в автомобилестроении – для деталей и корпусов грузовых и легковых автомашин с электрической силовой установкой, цистерн, дверей, бамперов и корпусов агрегатов; в судостроительной промышленности – для деталей и корпусов морских и речных судов, гребных винтов, в панелях и надстройках; в строительстве – для изготовления панелей жилых домов, балок, пролетов мостов, кранов; в электротехнике – для изготовления опор линий электропередач, деталей электродвигателей и высоковольтных изоляторов; в железнодорожном транспорте – для изготовления вагонов, контейнеров и узлов подвески; в нефтяной и газовой промышленности – для бурения скважин и при постройке трубопроводов.

На финальном этапе производства изделий из ПКМ требуется прецизионная размерная обработка по внутренним и внешним контурам формованных заготовок. Одной из часто встречающихся и в то же время наиболее трудоемкой операцией при обработке ПКМ является формирование отверстий различного назначения: крепежных, технологических, базовых, контрольных и др. Для выполнения этих операций применяются механический, гидроабразивный и лазерный способы обработки. Проблемы при обработке ПКМ определяются их сложным строением: слоистой структурой, неоднородностью состава и высокой анизотропией механических и теплофизических свойств. Каждый способ обработки обладает определенными преимуществами и недостатками [12–15]. При механической обработке волокнистых ПКМ 90 % теплоты уходит в инструмент, 5 % в стружку и 5 % в обрабатываемую деталь. Такие тепловые условия обработки требуют охлаждения инструмента эмульсиями, что может ухудшить физико-

механические свойства детали, или сжатым воздухом, что требует установки фильтровентиляционной системы для уменьшения концентрации вредных веществ. Технологический процесс механической обработки ПКМ характеризуется образованием макротрещины в материале перед рабочей кромкой режущего инструмента с формированием стружки. Однако, наряду с главной трещиной, образуется сетка мелких трещин, направленных вглубь материала, которые формируют дефектную область. Анизотропия механических свойств определяет различия режимов обработки ПКМ в разных направлениях и необходимость разработки особых технологических приемов для достижения высокого качества. Целый ряд проблем возникает ввиду высокой твердости армирующих наполнителей ПКМ – в первую очередь это необходимость применять дорогостоящие сверхтвердые инструментальные материалы, например, при обработке углепластиков.

Одним из основных видов механической обработки ПКМ является сверление качественных отверстий для заклепочных и болтовых соединений. Такие характеристики отверстий, как точность, шероховатость и отклонение оси от перпендикуляра к поверхности могут быть причиной повышения концентрации напряжений в зоне механического крепления, ведущей к его преждевременному разрушению. Типовыми дефектами при механическом сверлении отверстий в ПКМ являются: термодеструкция полимерной матрицы из-за высокой интенсивности обработки; вырывание волокон и фрагментов матрицы вследствие износа инструмента; расслоение и сколы материала на входе и выходе сверла по причине склонности некоторых типов ПКМ, в частности углепластиков, к межслоевому разрушению. При этом свойства волокнистого наполнителя, тип и схема армирования оказывают большее влияние на обрабатываемость режущим инструментом по сравнению с материалом полимерной матрицы. Для устранения указанных дефектов используют ряд технологических приемов: проводят сверление в несколько этапов с предварительным выполнением “пилотного” отверстия диаметром не более 0,5 от заданного; применяют алмазный инструмент, ресурс которого может достигать 300 отверстий; используют специальные подпоры, прижимы и приводы с регулируемой подачей для снижения расслаивающих усилий на материал. Следует учитывать, что точность сверления отверстий в ПКМ находится в пределах 11 ÷ 12 квалитетов.

Технологии гидроабразивного резания (ГАР) наряду с другими высокотехнологичными способами также используются при обработке ПКМ. ГАР основано на сжати рабочей жидкости до сверхвысоких давлений (до 400 МПа) с последующим продавливанием через специальное сопло диаметром около 250 мкм. В зоне обработки кинетическая энергия высокоскоростной струи жидкости с частицами абразива (800 ÷ 900 м/с) преобразуется в механиче-



скую работу – резание. При ГАР ПКМ обеспечивает возможность обработки по сложному контуру с отсутствием зоны термического влияния (ЗТВ), пыли и токсичных испарений. На установках портального типа ведущих мировых производителей, например RESATO (Голландия), для прецизионной обработки точность составляет порядка  $\pm 100$  мкм, а конусность канала реза не превышает 100 мкм. При этом существует ряд недостатков, снижающих возможности использования данного способа:

1) высокие эксплуатационные затраты вследствие большого количества расходных материалов: абразивный песок, сопло, фокусирующие трубки, уплотнители помпы и др.;

2) необходимость гашения энергии режущей струи в ванне с толщиной слоя воды порядка 700 мм;

3) преимущественное использование ГАР для резки листовых заготовок вследствие существенных ограничений при обработке деталей сложной формы;

4) опасность изменения физико-механических свойств материала, обусловленная сорбцией (поглощением) влаги, что в особенности критично при обработке углепластиков ввиду снижения их упругопрочностных свойств из-за пластикации и микрорастрескивания матрицы в приграничном слое;

5) значительное растрескивание и расслоение вследствие возникновения и распространения волн напряжения в области, окружающей начальную точку проникновения струи в заготовку, что затрудняет обработку по внутренним контурам, например: для формирования сквозных отверстий необходимо изготовление предварительного отверстия меньшего диаметра механическим или иным способом;

6) повышенный уровень шума.

Лазерная обработка ПКМ представляет собой бесконтактный термический процесс, результат которого зависит от технических параметров лазера, фокусирующей оптической системы, технологических свойств материала и метода обработки. При сопоставлении с рассмотренными способами лазерной обработки имеет ряд преимуществ:

1) отсутствие износа инструмента и потребности в его замене;

2) отсутствие механического воздействия на материал, а значит, необходимости в зажимной оснастке;

3) возможность обработки деталей сложной формы с высокой скоростью, точностью и воспроизводимостью;

4) возможность создания узких щелей, тонких стенок, малых радиусов, отверстий с малым диаметром под заданным наклоном к поверхности;

5) высокая производственная гибкость благодаря автоматическому управлению технологическим процессом;

6) высокая универсальность применения для обработки различных типов ПКМ;

7) высокая экономическая эффективность.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что лазерная обработка ПКМ является перспективным технологическим направлением в качестве альтернативы традиционным способам. Вместе с тем при обработке лазерным излучением возникает термодеструкция полимерного связующего, что приводит к нарушению прочности сцепления армирующего волокнистого наполнителя (АВН) с полимерной матрицей и, следовательно, к снижению эксплуатационных свойств материала, в первую очередь упругопрочностных. Наибольшие сложности возникают при лазерной обработке волокнистых ПКМ с высокой неоднородностью и анизотропией теплофизических свойств. В работе [16] показано, что углепластики с термореактивной матрицей характеризуются высокой температурой испарения углеродного волокна –  $\approx 4\ 000$  К – при температуре устойчивости материала полимерной матрицы не более 500 К. С учетом высокой энергоемкости процесса разрушения в испарительном режиме и высокой теплопроводности углеродного волокна задача по качественной лазерной обработке углепластиков с минимальной ЗТВ является одной из наиболее сложных по сравнению с другими типами ПКМ. В связи с этим экспериментальные и теоретические исследования, направленные на разработку технологии качественной лазерной обработки волокнистых ПКМ, являются актуальными.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\kappa$	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
$\lambda$	Длина волны излучения, мкм
$\tau$	Длительность импульса излучения, нс
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$A$	Спектральный коэффициент поглощения излучения, %
$a$	Коэффициент температуропроводности, м <sup>2</sup> /с
$D$	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм
$E$	Энергия, Дж
$F$	Фокусное расстояние линзы, мм
$f$	Частота следования, Гц
$h$	Толщина образца, мм
$L$	Ширина/расстояние, мм
$n$	Количество проходов
$P$	Мощность лазера, Вт

Продолжение списка обозначений

$R_a$	Среднеарифметическое отклонение профиля, мкм
$R_z$	Высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм
$T$	Температура, К
$i$	Конусность, мкм
$V$	Скорость, м/с
$W$	Плотность мощности, Вт/см <sup>2</sup>
<b>Индексы нижние</b>	
имп	Импульсный
исп	Испарения
н	Начальная
непр	Непрерывный
паузы	Паузы
Пор	Пороговая
резки	Резки
скан	Сканирования
ср	Средний
штрих	Параллельные треки-линии
<b>Аббревиатуры</b>	
АВН	Армирующий волокнистый наполнитель
ГАР	Гидроабразивное резание
ЗТВ	Зона термического влияния
ПКМ	Полимерные композиционные материалы

## 2. Теоретическая часть. Состояние и перспективы развития лазерной технологии по обработке ПКМ

Лазерная обработка армированных ПКМ – это сложный многофакторный технологический процесс, в котором значительное влияние на результат оказывают неоднородность и анизотропия теплофизических свойств и чувствительность материала к концентрации напряжений. Основными факторами и параметрами, определяющими режимы технологического процесса и влияющими на качество лазерной обработки, являются: характеристики лазера, параметры фокусирующей оптической системы, технологические свойства материала, тип технологического газа и скорость перемещения лазерного луча в поле обработки. Базовые основы технологического процесса лазерной обработки ПКМ впервые были заложены в известных работах А.Г. Григорьянца [15, 17, 18]. Согласно этим работам, при лазерной обработке в импульсно-периодическом и непрерывном режимах наиболее характерным и реализуемым на практике механизмом удаления материала является испарение, которое ввиду сложного химического строения неметаллических материалов характеризуется процессом термодеструкции за счет последовательного разложения отдельных составляющих (возгонки вещества). При этом достижение высокого качества с минимальной ЗТВ при обработке углепластиков с термореактивной матрицей представляется наиболее сложной задачей по сравнению с другими типами ПКМ по следующим причинам:

1. Высокая температура испарения углеродных волокон и коксового остатка ( $\approx 4\ 000\ K$ ), образующегося в результате термодеструкции полимерной матрицы, в совокупности с отводом тепла в опреде-

ленном направлении из-за анизотропии теплофизических свойств материала приводит к тому, что связующая полимерная матрица, стабильная только до температур  $200 \div 300\ ^\circ C$ , начинает разрушаться, и формируется ЗТВ с ее частичной и полной термодеструкцией.

2. Низкая трещиностойкость и остаточная прочность термореактивных углепластиков при наличии дефектов и, как следствие, их большая чувствительность к концентрации напряжений и склонность к преждевременному разрушению.

Удаление продуктов эрозии (разрушения) из канала реза происходит в виде парокapельной фазы с околозвуковыми скоростями. Данный процесс вместе с формированием значительного температурного градиента приводит к возникновению волн давления и термомеханических напряжений, которые могут привести к растрескиванию материала [19, 20]. Ввиду того что механизмы поглощения излучения в металлах достаточно сложны и могут существенно отличаться в разных спектральных диапазонах, а также зависят от температуры, состояния и структуры материала, достаточно сложно рассчитать их коэффициенты отражения и поглощения. Так, по существующим данным, на длине волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 10,6\ \mu m$ ) полимерная матрица и основные виды армирующих волокнистых наполнителей характеризуются высокими коэффициентами поглощения излучения [17, 18, 21], поэтому установки на данном типе лазеров широко применяются для обработки ПКМ, в частности углепластиков. Армирующий углеродный наполнитель имеет высокий коэффициент поглощения не только в инфракрасной, но и в видимой и ультрафиолетовой областях спектра ( $A \approx 0,8$ ). Связующая поли-



мерная матрица характеризуется низким поглощением в ближнем ИК-диапазоне и видимой области спектра ( $A \approx 0,1$ ), а в ультрафиолетовой области спектра, напротив, имеет высокий коэффициент поглощения ( $A = 0,8 \div 0,9$ ) [17, 22–24].

В отечественных и зарубежных работах [12, 15, 17, 18, 21, 25–29] на базе исследований по лазерной обработке ПКМ излучением импульсных и непрерывных лазеров инфракрасного, видимого и ультрафиолетового спектра, проведенных различными коллективами авторов за последние годы, рассмотрены основные подходы к оценке качества детали. Основные показатели качества обработки определяются дефектами макро- и микрогеометрии канала лазерного реза: ЗТВ, конусность и шероховатость, расслоение, растрескивание.

На основе оценки ЗТВ вводят три класса качества деталей [26–28]:

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

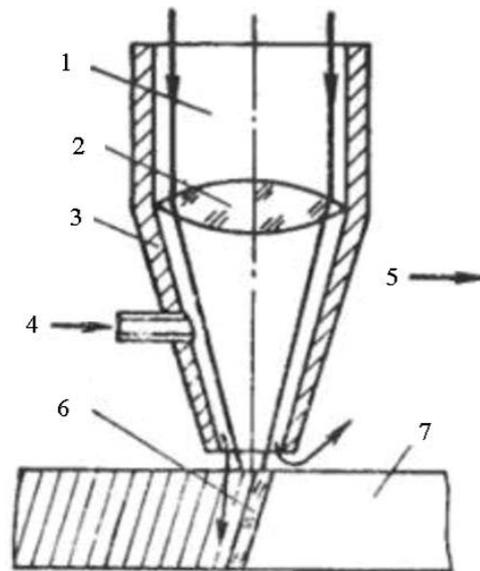
2. Класс Б – удовлетворительное качество:  $50 \leq L_{зтв} \leq 150$  мкм, допускается видимое тепловое повреждение материала матрицы.

3. Класс С – неудовлетворительное качество:  $L_{зтв} \geq 150$  мкм, значительное видимое тепловое повреждение материала матрицы.

Класс точности изготавливаемых деталей, в частности сквозных отверстий различного назначения, определяется конусностью (клиновидностью) канала реза, которая характеризуется максимальным отклонением от нормали его поверхности. Для каждой конкретной детали максимально возможное отклонение размеров определяется ее функциональным назначением и указывается в конструкторской документации. Для практического применения лазерной резки ПКМ в промышленности ее точность не должна уступать традиционным способам. Так, при обработке по сложным контурам гидроабразивная резка обеспечивает конусность канала реза не более 100 мкм [12, 15, 30–32]. При сверлении отверстий различного назначения, в том числе крепежных, в деталях из ПКМ экономически целесообразным считается выполнение обработки по качеству Н12, что соответствует классу точности «Точный» по ГОСТу 30893.1-2003. Шероховатость поверхности канала лазерного реза оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства детали и устанавливается исходя из ее функционального назначения. Степень шероховатости, согласно ГОСТу 2789-73, характеризуется следующими основными параметрами:  $R_a$  – среднearифметическое отклонение профиля;  $R_z$  – высота неровностей профиля по десяти точкам. Экономически целесообразные значения шероховатости, соответствующие заданной точности изготовления, приведены в справочниках [33–35]. Например, при обработке отверстий с точностью по качеству Н12

рекомендуемая шероховатость поверхности не должна быть хуже  $R_z = 40$  мкм. Все дефекты микро- и макрогеометрии канала реза, вносимые способом обработки, приводят к повышению концентрации напряжений и способствуют снижению упругопрочностных свойств материала. Поэтому при разработке технологий качественной лазерной обработки ПКМ крайне важным представляется проведение сравнительных механических испытаний конструктивно-подобных образцов, изготовленных различными способами обработки: механическим, гидроабразивным и лазерным.

В отечественных и зарубежных работах [15, 21, 36–52] основная часть исследований по разработке технологии лазерной обработки ПКМ носит комплексный или экспериментальный характер. Лазерная обработка используется для удаления материала при резке формованных заготовок по заданному контуру, для создания отверстий, пазов и других элементов. В качестве исследуемых ПКМ, как правило, выступают широко применяемые в современной промышленности угле- и стеклопластики толщиной от 1 мм до 3 мм. Основным методом лазерной обработки является газолазерная резка ПКМ в присутствии неактивных и инертных технологических газов. Схематичное изображение технологического процесса газолазерной резки показано на рис. 2 [17, 18].



**Рис. 2** – Схематичное изображение метода газолазерной резки ПКМ с использованием неактивных и инертных технологических газов: 1 – коллимированный лазерный луч; 2 – фокусирующая линза; 3 – формирующее сопло; 4 – технологический газ; 5 – направление резки; 6 – вынос продуктов разрушения газовой струей; 7 – образец  
**Fig. 2** – Schematic representation of the method of gas laser cutting polymer composites with inactive and inert process gases: 1 – collimated laser beam; 2 – focusing lens; 3 – nozzle; 4 – process gas; 5 – cutting direction; 6 – removal of destruction products by a gas jet; 7 – sample

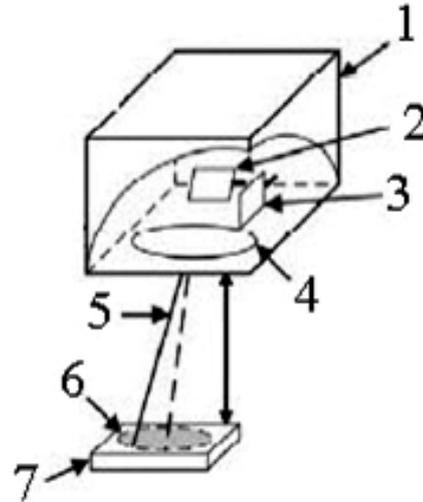
Газолазерная резка производится на 3-х и 5-ти координатных технологических комплексах на основе

импульсных и непрерывных газовых и твердотельных лазеров в однопроходном режиме и характеризуется скоростью перемещения луча  $1 \div 20$  м / мин. Несмотря на высокую точность и производительность такой метод лазерной резки ПКМ имеет ограничения в промышленности. В первую очередь это связано с необходимостью обеспечения высокого качества обработки, которое позволит рассматривать лазерную обработку как альтернативу механической и гидроабразивной. По представленным в указанных работах результатам лазерной обработки угле- и стеклопластиков основным недостатком такого метода является формирование канала реза с ЗТВ шириной от 1 мм до 8 мм, высокой конусностью – 200 мкм и более и шероховатостью  $R_z \geq 160$  мкм. Кроме того, в области входа луча в рабочий канал реза формируется дефектный кратер диаметром до 10 мм, что ограничивает возможности по формированию сквозных отверстий меньшего и сопоставимого диаметра.

Для уменьшения ЗТВ в соответствии с требованиями классов А и Б целесообразно увеличение скорости обработки за счет повышения плотности мощности излучения в сфокусированном световом пятне. Решение данной задачи определяется параметрами ключевых компонентов технологической установки: лазера, фокусирующей оптической системы и механизма перемещения луча в рабочем поле. При выборе этих компонентов необходимо также учитывать особенности применения в промышленности, где важными аспектами являются высокая экономическая эффективность, ресурс, стабильность технических характеристик, повторяемость результатов и удобство интеграции.

Вследствие распространения в промышленности технологического оборудования на основе газовых CO<sub>2</sub>-лазеров и высокого коэффициента поглощения полимерной матрицы и АВН на длине волны излучения  $\lambda = 10,6$  мкм, они широко применяются для обработки угле- и стеклопластиков. Однако средние показатели качества обработки, отсутствие возможности обеспечения плотности мощности в рабочем пятне излучения  $\geq 10^9$  Вт / см<sup>2</sup> и передачи излучения с высоким КПД по оптическому волокну, а также высокие затраты на сервисное обслуживание по сравнению с современными твердотельными волоконными и дисковыми промышленными лазерами стали основными факторами, определившими необходимость поиска новых решений.

Современный этап развития технологии лазерной обработки ПКМ связан с разработкой эффективных импульсных и непрерывных лазерных источников инфракрасного, видимого и ультрафиолетового диапазона и высокоскоростных гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой, обеспечивающих плоское рабочее поле размером до 500x500 мм<sup>2</sup> [53]. Схематичное изображение такого метода лазерной обработки ПКМ представлено на рис. 3 [53].



**Рис. 3** – Схематичное изображение метода лазерной обработки ПКМ с использованием гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой: 1 – сканирующая оптическая система; 2 – зеркало оси X; 3 – зеркало оси Y; 4 – фокусирующая F-Theta линза; 5 – лазерный луч; 6 – рабочее поле; 7 – образец

**Fig. 3** – Schematic depiction of the method of polymer composites laser processing using an optical scanning system based on galvanic drives with a focusing F-Theta lens: 1 – scanning optical system; 2 – mirror of the X axis; 3 – mirror of the Y axis; 4 – focusing F-Theta lens; 5 – laser beam; 6 – working field; 7 – sample

Промышленные пико- и наносекундные импульсные лазеры с частотой повторения импульсов в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц успешно применяются для прецизионной микрообработки широкого класса материалов. Средняя мощность излучения таких лазеров, как правило, не превышает нескольких десятков Вт, а импульсная достигает десятков кВт. Широкая номенклатура отечественных и зарубежных оптических сканирующих систем с F-Theta линзами позволяет обеспечить плотность мощности в сфокусированном световом пятне на уровне  $10^9$  Вт / см<sup>2</sup> и скорости перемещения луча в рабочем поле до 20 м / с. На основании данных, представленных в работах ряда зарубежных авторов [37–51], можно отметить некоторые особенности данного метода лазерной обработки ПКМ:

1. При рациональном выборе ключевых компонентов технологической установки и параметров режима обработки обеспечивается ЗТВ в соответствии с классом А –  $\leq 50$  мкм.

2. Для повышения эффективности выноса продуктов эрозии из канала реза рациональным направлением является послыйное удаление материала за несколько проходов по нескольким параллельным трекам-линиям.

Наряду с импульсными лазерами перспективным направлением представляется применение непрерывных твердотельных лазеров с мощностью излучения 1 кВт и более. В настоящее время благодаря

высоким технико-эксплуатационным свойствам наибольшее распространение получили дисковые и волоконные лазеры. Существенные отличия параметров непрерывного излучения по сравнению с импульсным обуславливают необходимость применения специальных оптических сканирующих систем с увеличенной входной апертурой зеркал и фокусирующей F-Theta линзой и нанесение специальных отражающих и просветляющих покрытий со стабильными характеристиками при уровне мощности излучения 1 кВт и более. Только в последние годы ведущие мировые производители лазерного технологического оборудования, такие как TRUMPF (Германия) и AMADA MIYACHI (США), разработали подобные установки на основе высокомошных дисковых и волоконных лазеров. Среди оборудования отечественного производства следует отметить импульсные и непрерывные волоконные итербиевые лазеры с длиной волны излучения  $\lambda = 1,06$  мкм. Этот класс лазеров обладает уникальной совокупностью технико-эксплуатационных свойств: КПД более 50 %, высокие плотность мощности излучения и стабильность выходных параметров, отсутствие расходных материалов и необходимости в сервисном обслуживании, ресурс работы до 100 000 часов, удобство волоконной доставки излучения и компактные размеры [54]. Проведенный анализ показал, что применение импульсных и непрерывных волоконных итербиевых лазеров, обладающих высокими технико-эксплуатационными свойствами, и современных оптических сканирующих систем позволяет достигать высоких плотностей мощности в сфокусированном световом пятне и скоростей обработки. Следовательно, эти лазеры являются рациональным выбором в качестве базовых компонентов для внедрения методов лазерной обработки ПКМ в промышленности как альтернативы механической и гидроабразивной обработке.

### 3. Экспериментальное оборудование для обработки ПКМ излучением волоконных итербиевых лазеров

Выбор ключевых компонентов технологической установки для обработки ПКМ обусловлен необходимостью обеспечения высокой плотности мощности в сфокусированном световом пятне и высокоскоростного перемещения луча в рабочем поле. Так, для удаления углепластика излучением импульсных и непрерывных лазеров за счет механизма испарения требуется, чтобы плотность мощности в сфокусированном световом пятне превышала пороговые значе-

ния, рассчитанные по известным формулам (1) и (2) [55, 56]:

$$W_{\text{пор.имп.}} = \frac{(T_{\text{исп}} - T_{\text{н}}) \kappa \sqrt{\pi}}{2A \sqrt{a \tau}} \approx 10^8 \text{ (Вт/см}^2\text{)}, \quad (1)$$

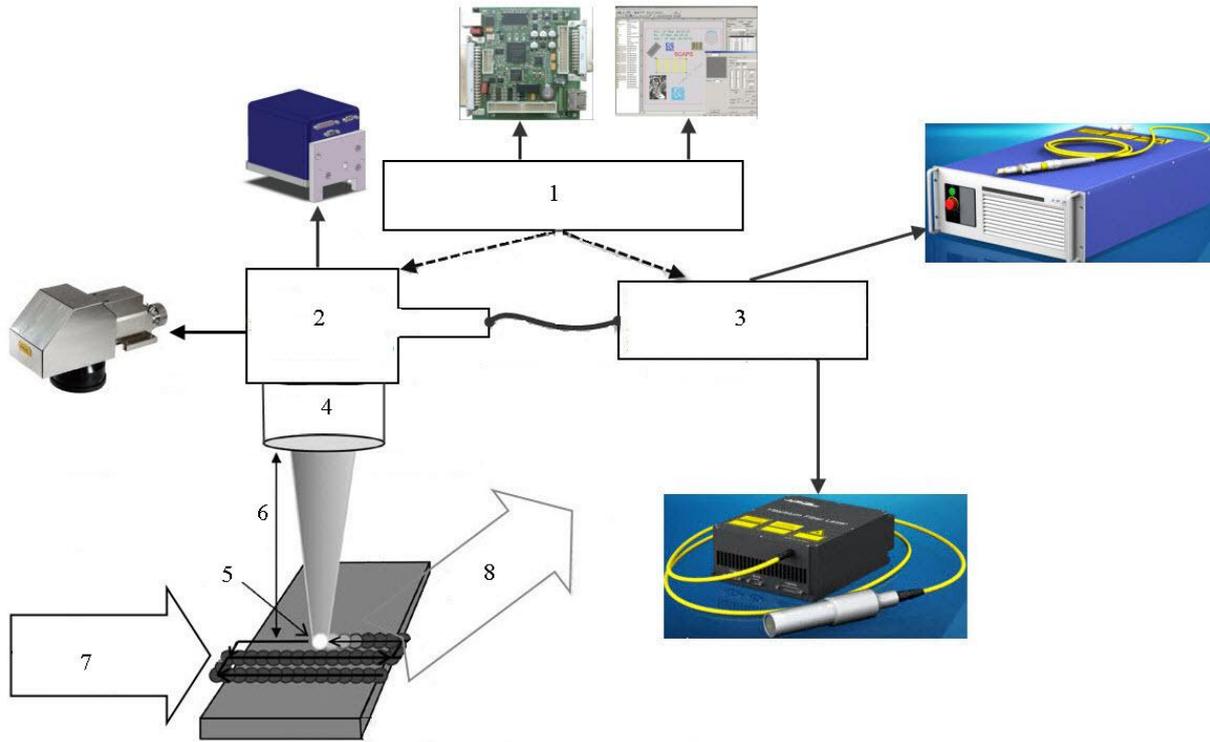
$$W_{\text{пор.непр.}} = \frac{(T_{\text{исп}} - T_{\text{н}}) \kappa}{A \frac{D}{2}} \approx 10^6 \text{ (Вт/см}^2\text{)}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{н}} = 293$  К – начальная температура материала;  $T_{\text{исп}} = 4\,000$  К – температура испарения углеродного волокна;  $\kappa = 50$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности;  $A = 0,8$  – коэффициент поглощения излучения;  $a = 4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности;  $\tau = 1$  нс – длительность импульса излучения;  $D = 100$  мкм – типовой диаметр сфокусированного светового пятна. Расчеты показали, что при использовании наносекундных импульсных лазеров уровень пороговой плотности мощности составляет  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, а для непрерывных лазеров при типовом диаметре сфокусированного светового пятна на уровне 100 мкм –  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для достижения высоких качества и производительности лазерной обработки ПКМ необходимо соблюсти и ряд дополнительных условий: локальность области воздействия (нагрева); длину перетяжки (глубину фокуса), сопоставимую с толщиной образца; высокую скорость перемещения луча в рабочем поле. Выполнение этих условий требует поиска компромиссного решения, основанного на анализе технических параметров ключевых компонентов технологической установки: лазеров, оптических сканирующих систем, фокусирующих F-Theta линз, – и учета особенностей практического применения в производственных условиях. Рациональным решением представляется использование следующих серийно выпускаемых компонентов:

- 1) волоконный итербиевый лазер YLPP-1-150-30-M с  $\lambda = 1,06$  мкм с наносекундной длительностью импульсов и  $P_{\text{ср}} = 30$  Вт;
- 2) волоконный итербиевый лазер ЛК-1000-ОМ с  $\lambda = 1,06$  мкм, непрерывный с мощностью  $P = 1$  кВт;
- 3) двухосевые гальваносканеры с входной апертурой 10 мм и 12 мм;
- 4) F-Theta линзы с фокусным расстоянием  $F = 254$  мм и 330 мм.

Основные компоненты лазерной технологической установки на базе волоконного итербиевого лазера для обработки ПКМ представлены на рис. 4.





**Рис. 4** – Основные компоненты лазерной технологической установки для обработки ПКМ: 1 – управляющий контроллер; 2 – двухосевой гальваносканер; 3 – импульсный или непрерывный волоконный иттербиевый лазер; 4 – фокусирующая F-Theta линза; 5 – сфокусированное световое пятно; 6 – фокусное расстояние; 7 – подача технологического газа; 8 – фильтровентиляционная система

**Fig. 4** – The main components of the experimental laser processing technological setup for polymer composites machining: 1 – main controller; 2 – two-axis galvo scanner; 3 – pulsed or continuous ytterbium fiber laser; 4 – focusing F-Theta lens; 5 – focused light spot; 6 – focal length; 7 – supply of process gas; 8 – filtration system

Результаты расчета основных параметров сфокусированного обрабатывающего светового пятна по известным формулам [55, 56] для типовых исполне-

ний экспериментальной технологической установки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Основные параметры сфокусированного обрабатывающего светового пятна типовых исполнений технологической установки

Table 1  
The main parameters of the focused processing light spot of the technological setup typical versions

Тип лазера	Фокусное расстояние F-Theta линзы, мм	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм	Глубина фокуса, мм	Импульсная мощность кВт	Плотность мощности излучения, Вт/см <sup>2</sup>
YLPP-1-150-30-M	330	100	14	200 (30 Вт, 30 кГц, 5 нс)	$2 \cdot 10^9$
ЛК-1000-ОМ	254	70	7,5	–	$2,5 \cdot 10^7$

Исследования показателей качества обработки проводились с использованием современного метрологического оборудования. ЗТВ на поверхности образца со стороны входа и выхода луча, дефекты внутренней структуры на микрошлифе поперечного сечения и ширина канала лазерного реза оценивались при помощи оптического микроскопа с увеличением  $5 \div 1\,000$  крат. Конусность и шероховатость канала лазерного реза измерялись на контактных

контурографе и профилометре. Дефекты внутренней структуры на поверхности канала лазерного реза, такие как: расслоение, растрескивание и области с термодеструкцией материала полимерной матрицы – исследовались с применением электронных сканирующих микроскопов с разрешением до 1 нм, непрерывным увеличением от 2 крат до 2 000 000 крат и ускоряющим напряжением до 30 кВ.

#### 4. Структура и технологические свойства ПКМ

В современной промышленности широкое применение находят тонколистовые ПКМ, в частности, углепластики толщиной от 1 мм до 3 мм, изготов-

ленные методами прямого прессования, вакуумного и автоклавного формования. В табл. 2 представлены основные технологические свойства распространенных отечественных и зарубежных марок углепластиков.

Таблица 2  
Технологические свойства отечественных и зарубежных марок углепластиков  
Table 2  
Technological properties of domestic and foreign brands of CFRP

Марка ПКМ	Схема укладки слоев (армирования)	Массовое содержание АВН, %	Толщина слоя, мм
M21/35%/T700 (однонаправленный препрег)	Продольно-поперечная (ортотропная), комбинированная	65	0,13
ВКУ (однонаправленный препрег)			
5320-1/T650/3K (тканый препрег)	Однонаправленная	67	0,2

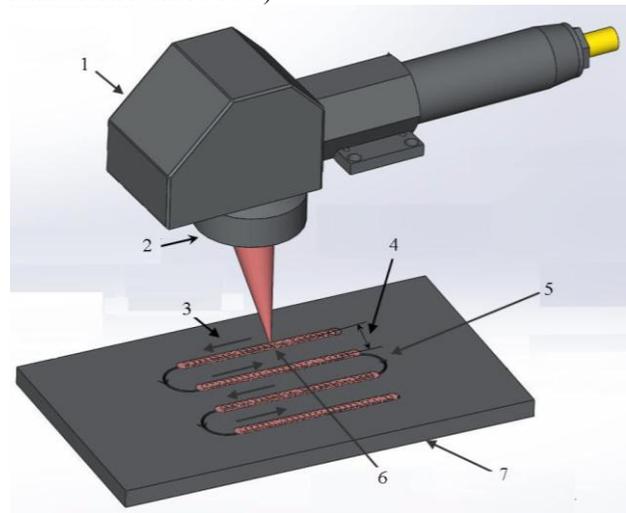
В качестве армирующего волокнистого наполнителя в указанных углепластиках применяется углеродное волокно на основе полиакрилонитрила с объемным содержанием углерода 92 % и температурой тепловой обработки  $\approx 2\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , а связующая полимерная матрица является реактопластом на основе эпоксидных смол. Типовые теплофизические и оптические параметры таких материалов представлены в работах [16, 21, 57–63].

#### 5. Результаты экспериментальных исследований по лазерной резке углепластиков

В работах [64–71] по лазерной резке и сверлению углепластиков исследования проводились на экспериментальной технологической установке с помощью импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров и высокоскоростных оптических сканирующих систем с фокусирующей F-Theta линзой и скоростью перемещения луча до 17 м/с. Обработка проводилась с применением лазеров моделей YLPP-1-150-30-M с  $P_{\text{ср}} = 30\text{ Вт}$  и плотностью импульсной мощности в сфокусированном световом пятне излучения диаметром 100 мкм –  $2 \cdot 10^9\text{ Вт/см}^2$  и ЛК-1000-OM с  $P = 1\text{ кВт}$ ,  $D = 70\text{ мкм}$ ,  $W = 2,5 \cdot 10^9\text{ Вт/см}^2$  (см. рис. 8 и табл. 1) и алгоритма многопроходной обработки по нескольким параллельным трекам-линиям, который увеличивает ширину канала реза и способствует достижению высокого качества. Схематично применяемый алгоритм многопроходной обработки представлен на рис. 5 [70].

Лазерная резка образцов излучением импульсного лазера модели YLPP-1-150-30-M проводилась путем послойного удаления материала с перемещением луча в соответствии с алгоритмом на рис. 5 и максимальной средней мощностью излучения  $P_{\text{ср}} = 30\text{ Вт}$  в многопроходном режиме без пауз между последова-

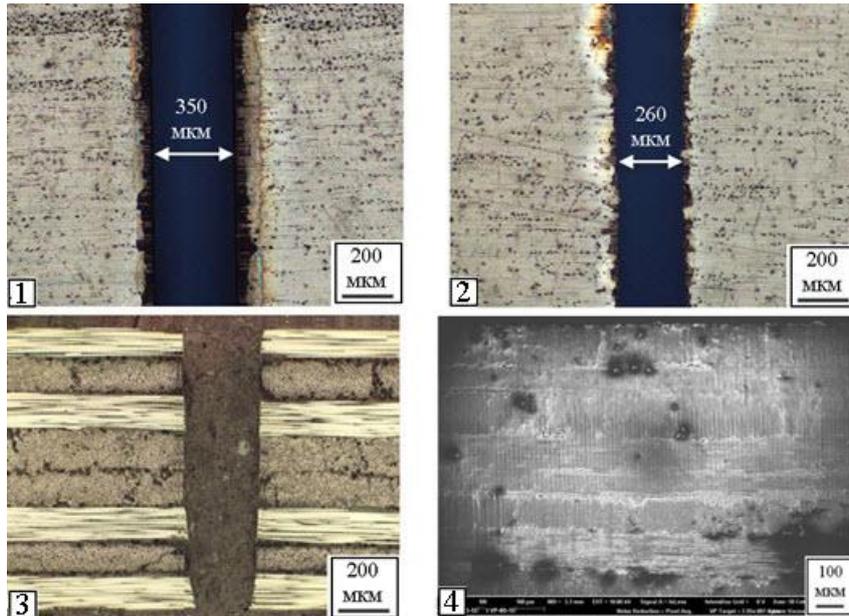
тельными проходами и в среде воздуха (без подачи технологического газа).



**Рис. 5** – Алгоритм лазерной многопроходной обработки углепластика по нескольким параллельным трекам-линиям: 1 – гальваносканер; 2 – фокусирующая F-Theta линза; 3 – трек перемещения лазерного луча; 4 – расстояние между параллельными треками; 5 – переходы без излучения; 6 – сфокусированное световое пятно; 7 – образец

**Fig. 5** – Algorithm of laser multi-pass processing of CFRP on several parallel tracks-lines: 1 – galvo scanner; 2 – focusing F-Theta lens; 3 – track of moving the laser beam; 4 – the distance between the parallel tracks; 5 – transitions without laser radiation; 6 – focused light spot; 7 – sample

Положение плоскости фокусировки излучения устанавливалось на поверхности образца со стороны входа луча и не смещалось в процессе обработки. В результате большого объема экспериментов были определены оптимальные технологические параметры:  $V_{\text{скан}} = 1\text{ м/с}$ ;  $\tau_{\text{имп}} = 5\text{ нс}$ ;  $f_{\text{имп}} = 30\text{ кГц}$ ;  $E_{\text{имп}} = 1\text{ мДж}$ ;  $L_{\text{штрих}} = 50\text{ мкм}$ ;  $N = 5$ ;  $n = 200$ . Результаты многопроходной обработки при таких технологических параметрах представлены на рис. 6 [64, 67].

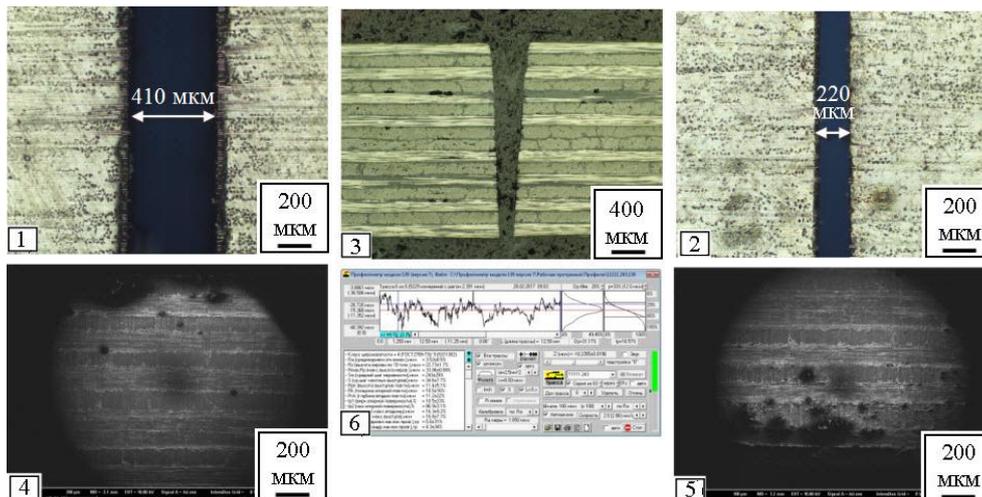


**Рис. 6** – Изображения поверхности образцов из углепластика толщиной 1 мм: 1 – со стороны входа и 2 – выхода луча; 3 – в поперечном сечении канала реза; 4 – поверхности канала реза на электронном микроскопе при обработке излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M ( $V_{\text{скан}} = 1$  м/с;  $T_{\text{имп}} = 5$  нс;  $f_{\text{имп}} = 30$  кГц;  $E_{\text{имп}} = 1$  мДж;  $L_{\text{штрих}} = 50$  мкм;  $N = 5$ ;  $n = 200$ )  
**Fig. 6** – Images of the surface of CFRP samples with a thickness of 1 mm: 1 – from the entrance and 2 – the exit of the beam; 3 – in the cross section of the cut channel; 4 – the surface of the cut channel on an electron microscope when laser radiation is processed by the YLPP-1-150-30-M model ( $V_{\text{скан}} = 1$  m/s;  $T_{\text{имп}} = 5$  ns;  $f_{\text{имп}} = 30$  kHz;  $E_{\text{имп}} = 1$  mJ;  $L_{\text{штрих}} = 50$   $\mu\text{m}$ ;  $N = 5$ ,  $n = 200$ )

Оптимальные технологические параметры режима обработки, указанные на рис. 6, обеспечивают полный канал реза за  $n = 200$  проходов с высоким качеством детали: ЗТВ соответствует классу А; конусность  $u < 50$  мкм; шероховатость  $R_z \approx 25$  мкм. При этом в поперечном сечении и на поверхности канала реза такие дефекты, как расслоение, растрескивание и термодеструкция материала матрицы отсутствуют. Скорость резки, рассчитываемая по формуле (3), составила:

$$V_{\text{резки}} = \frac{V_{\text{скан}}}{Nn} = 60 \text{ (мм/мин)} \quad (3)$$

Для качественной обработки углепластиков толщиной более 1 мм в [64–71] были разработаны новые методы многопроходной лазерной резки с количественной и пространственной регулировкой вводимой лазером энергии путем изменения скорости перемещения луча ( $V_{\text{скан}}$ ) и количества параллельных треков-линий ( $N$ ). Результаты, полученные с помощью разработанных методов, показаны на примере обработки углепластика марки М21/35%/Г700 с ортотропной схемой армирования, изготовленного методом прямого прессования, толщиной 2 мм при оптимальных технологических параметрах:  $\tau_{\text{имп}} = 5$  нс;  $f_{\text{имп}} = 30$  кГц;  $E_{\text{имп}} = 1$  мДж;  $L_{\text{штрих}} = 50$  мкм;  $n = 400$ ; снижение  $V_{\text{скан}}$  от 1 до 0,5 м/с и  $N$  от 8 до 5 через каждые 100 проходов (рис. 7) [67, 70].



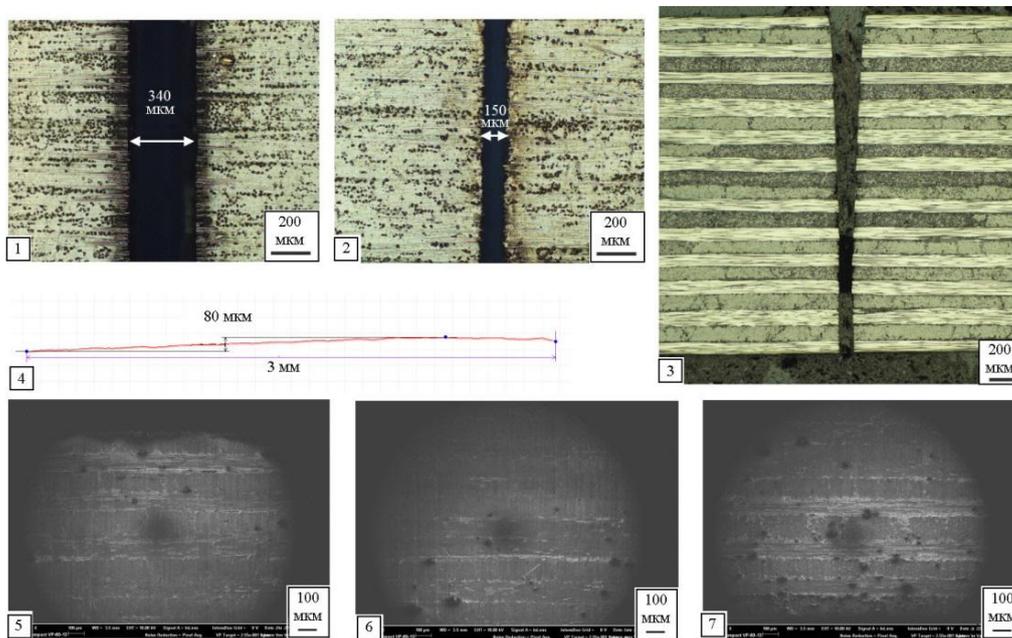
**Рис. 7** – Результаты обработки углепластика толщиной 2 мм излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M: 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 и 5 – поверхность канала реза на электронном микроскопе; результаты измерений: 6 – шероховатости и 7 – контура канала реза  
**Fig. 7** – The results of CFRP processing with a thickness of 2 mm by YLPP-1-150-30-M laser radiation: 1 and 2 – images of the sample surface from the entrance and the exit of the beam; 3 – micro sections of the cross-section of the cut channel; 4 and 5 – the surface of the cut channel on an electron microscope; measurement results: 6 – roughness and 7 – cutting channel contour

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм этим же лазером при оптимальных технологических параметрах:  $\tau_{\text{имп}} = 5$  нс;  $f_{\text{имп}} = 30$  кГц;  $E_{\text{имп}} = 1$  мДж;

$L_{\text{штрих}} = 50$  мкм;  $n = 600$ ;  $N = 5$ ; снижение  $V_{\text{скан}}$  от 1 м/с до 0,5 м/с через каждые 100 проходов – показаны на рис. 8 [67, 70].



**Рис. 8** – Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M: 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 – контур канала реза; 5, 6 и 7 – изображения поверхности канала реза на электронном микроскопе

**Fig. 8** – The results of CFRP processing a thickness of 3 mm by YLPP-1-150-30-M laser radiation: 1 and 2 – images of the sample surface from the entrance and the exit of the beam; 3 – micro sections of the cross-section of the cut channel; 4 – the contour of the cut channel; 5, 6, and 7 – images of the surface of the cut channel on an electron microscope

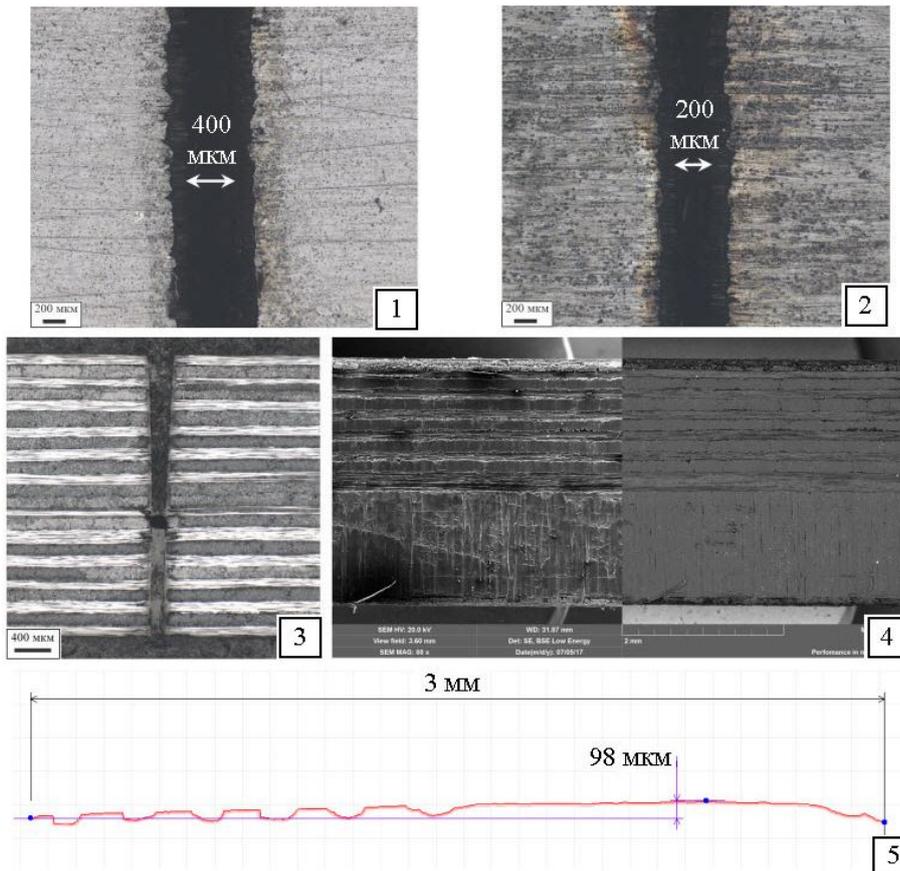
Представленные на рис. 7 и 8 данные свидетельствуют о том, что предложенные авторами методы многопроходной обработки углепластиков толщиной 2 мм и 3 мм излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера позволяют обеспечить высокое качество детали: ЗТВ соответствует классу А; конусность  $u \leq 100$  мкм; шероховатость  $R_z \leq 40$  мкм; такие дефекты, как расслоение и растрескивание отсутствуют; скорость резки  $V_{\text{резки}}$  до 30 мм/мин при толщине 2 мм и до 20 мм/мин при 3 мм. В результате проведенных исследований установлено, что наносекундные импульсные лазеры обеспечивают высокое качество детали из тонколистовых углепластиков, однако, скорость резки не превышает 60 мм/мин, что на порядок ниже, чем при механической и гидроабразивной обработке. Это ставит задачу увеличения скорости лазерной обработки с сохранением качества детали, для решения которой целесообразно применение непрерывных лазеров с мощностью излучения  $\geq 1$  кВт.

Лазерная резка образцов излучением непрерывного лазера модели ЛК-1000-ОМ в работах [64–71] проводилась по прямой линии с максимальной средней мощностью излучения  $P = 1$  кВт в многопроходном режиме с паузами между последовательными проходами и подачей в зону обработки сжатого воздуха с давлением 8 атм для охлаждения заготовки с

целью уменьшения ЗТВ вследствие эффекта накопления тепла в материале. Положение плоскости фокусировки излучения устанавливалось на поверхности и в середине образца со стороны входа луча и не смещалось в процессе обработки. В результате большого объема экспериментов были определены оптимальные технологические параметры:  $N = 2$ ;  $L_{\text{штрих}} = 200$  мкм;  $n = 30$ ;  $T_{\text{паузы}} = 0,5$  с;  $V_{\text{скан}}$  изменяется от 1 м/с до 0,5 м/с на 250 мм/с через каждые 10 проходов. Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм при таких технологических параметрах показаны на рис. 9 [71].

Данные, представленные на рис. 9, свидетельствуют о том, что многопроходная обработка углепластика толщиной 3 мм излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера при оптимальных технологических параметрах обеспечивает высокое качество детали, сопоставимое с результатами обработки излучением импульсных лазеров, а именно: ЗТВ характеризуется термоследом на поверхности материала шириной менее 150 мкм, что соответствует промежуточному положению между классами А и Б; конусность канала не превышает 100 мкм; шероховатость  $R_z \approx 40$  мкм; такие дефекты, как расслоение и растрескивание отсутствуют.





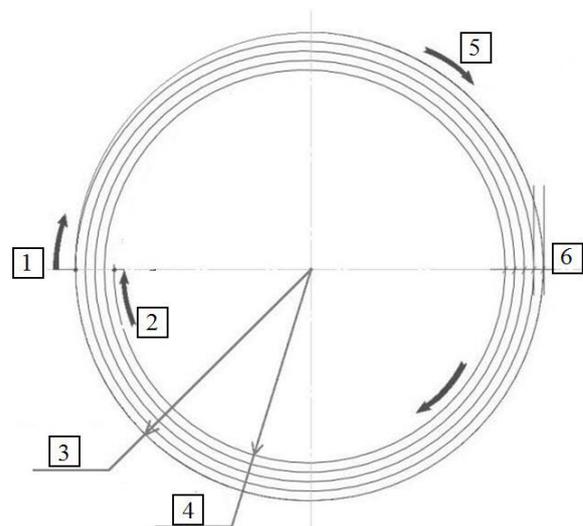
**Рис. 9** – Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели ЛК-1000-ОМ:  
 1 и 2 – изображения поверхности образца со стороны входа и выхода луча; 3 – микрошлифа поперечного сечения канала реза; 4 – поверхности канала реза на электронном микроскопе; 5 – контур поверхности канала реза

Максимально достижимая скорость резки углепластика толщиной 3 мм, рассчитываемая по формуле (3), составляет 1 м/мин, что на два порядка превосходит результаты импульсных лазеров.

### 6. Результаты экспериментальных исследований по лазерному сверлению углепластиков

Одной из наиболее часто встречающихся и в то же время наиболее трудоемких операций при обработке ПКМ является операция сверления. Трудоемкость сверлильных операций на некоторых изделиях достигает 80 % от общей трудоемкости процесса обработки, поэтому задачи по формированию качественных сквозных отверстий различного назначения в деталях из углепластиков представляют большой практический интерес. На основании результатов исследований по резке углепластиков толщиной 1 ÷ 3 мм излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров были определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество детали: ЗТВ в соответствии с классом А и Б; конусность менее 100 мкм; шероховатость  $R_z \leq 40$  мкм при скоростях резки до 3 м/мин. Применяемый для обработки по прямой линии алгоритм (см. рис. 5) был модифицирован в соответствии с поставленной задачей. Так, при формировании отверстий послойное удаление материала в каждом проходе осуществлялось по нескольким

концентрическим трекам-окружностям или трекам-спиралям. Пример такого алгоритма схематично представлен на рис. 10 [66, 69].



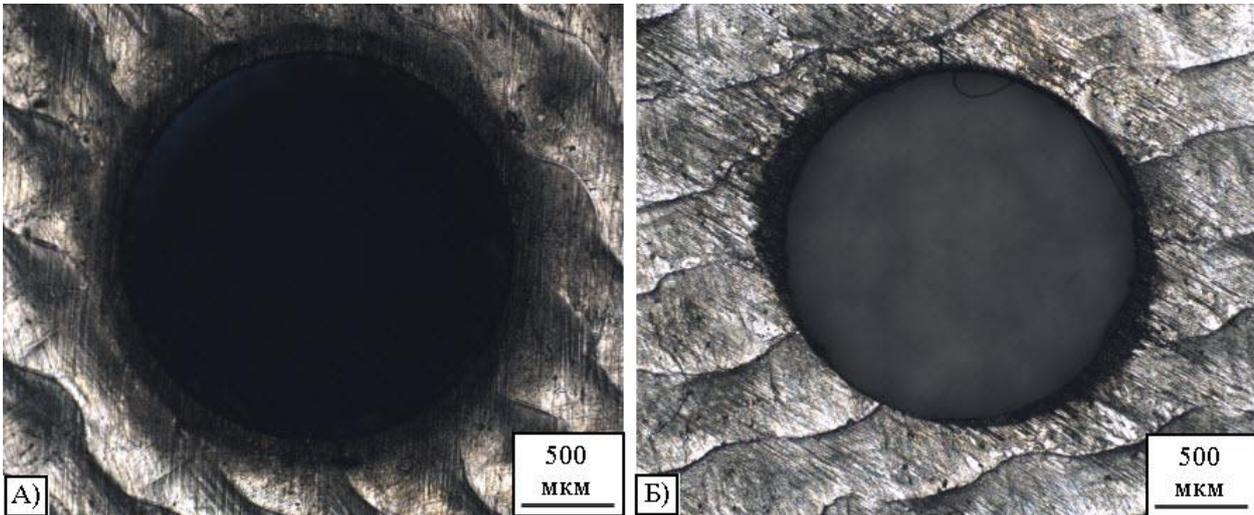
**Рис. 10** – Алгоритм лазерной многопроходной обработки углепластика по треку в форме спирали: 1 – старт обхода; 2 – завершение обхода; 3 – внешний радиус; 4 – внутренний радиус; 5 – направление развертки спирали; 6 – шаг спирали

**Fig. 10** – Algorithm of laser multi-pass CFRP processing on the track in the form of a spiral:  
 1 – pass start; 2 – pass finish; 3 – outer radius; 4 – inner radius; 5 – spiral scan direction; 6 – helical pitch



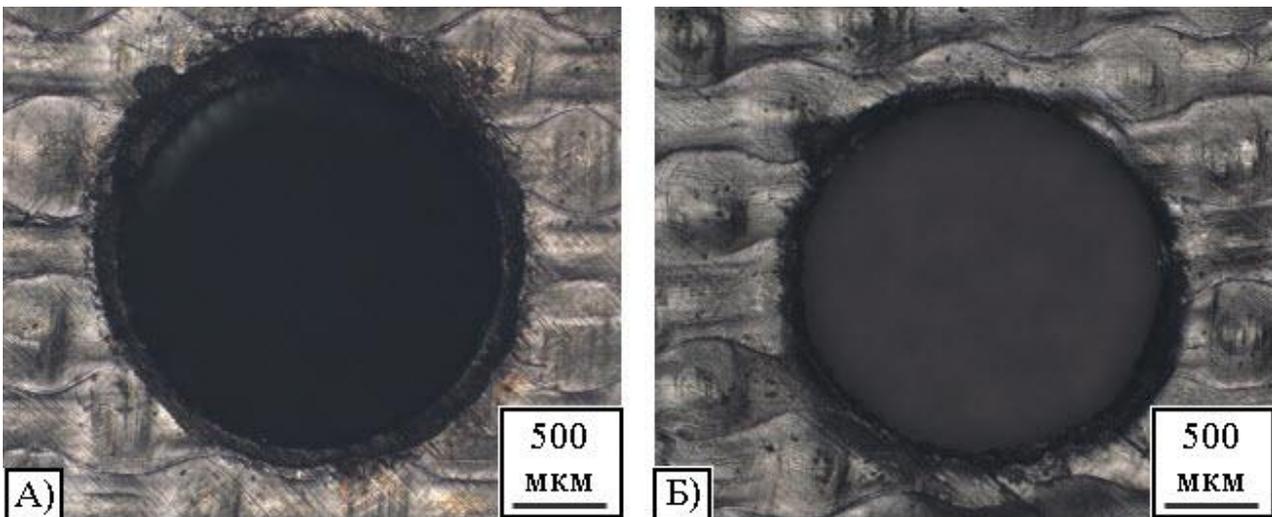
В ходе экспериментов было установлено, что выполнение прохода с разверткой луча по спирали предпочтительнее по сравнению с алгоритмом обработки по нескольким концентрическим окружностям, поскольку позволяет минимизировать дефекты формирования канала реза в точке старта обхода вследствие погрешностей синхронизации включения и выключения излучения лазера с перемещением

зеркал оптической сканирующей системы. На экспериментальной технологической установке с применением разработанных алгоритмов лазерного сверления отверстий при оптимальных технологических параметрах были получены сквозные отверстия диаметром от 2 мм до 16 мм в образцах из углепластика толщиной от 1 мм до 3 мм. Результаты представлены на рис. 11–14.



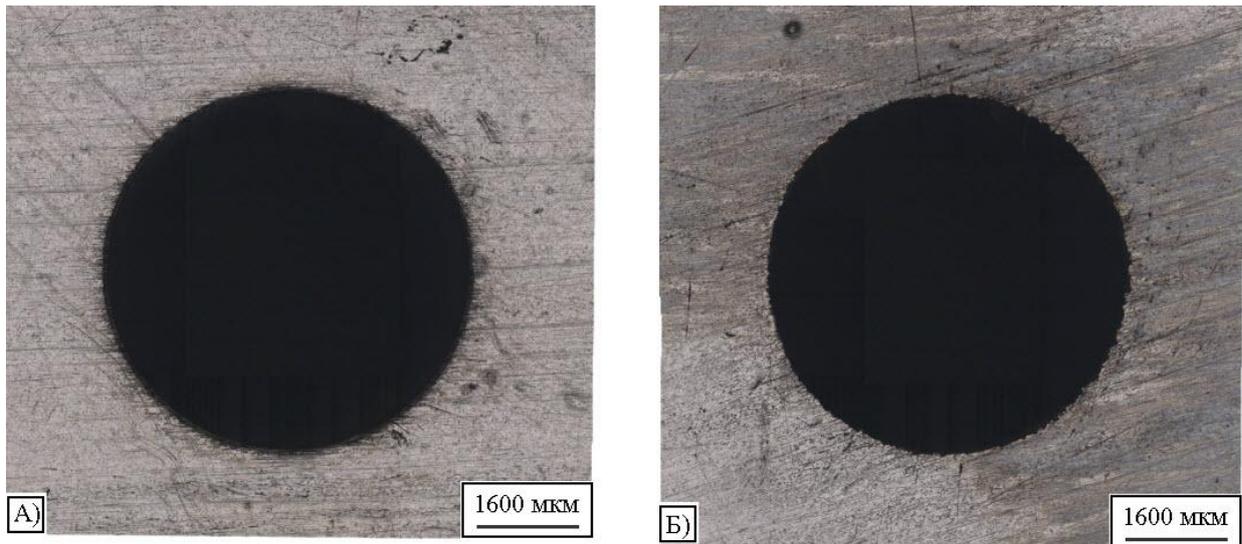
**Рис. 11** – Изображение поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 2 мм из углепластика толщиной 1,5 мм со стороны входа (А) и выхода луча (Б) при обработке излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера модели YLPP-1-150-30-M

**Fig. 11** – The image CFRP sample surface with 1.5 mm thickness and through hole 2 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the YLPP-1-150-30-M pulsed ytterbium fiber laser is processed



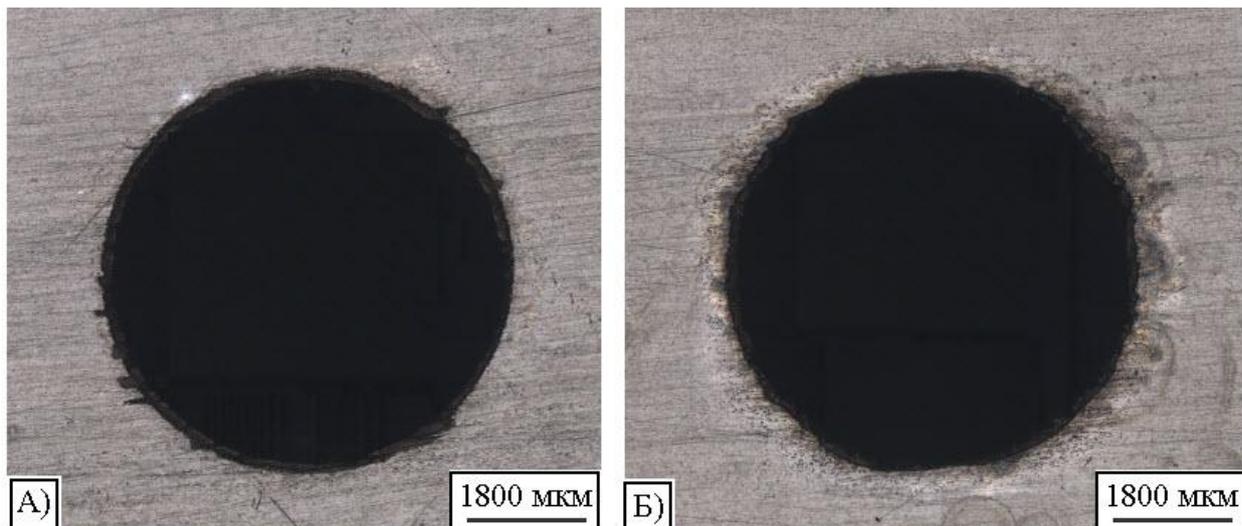
**Рис. 12** – Изображение поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 2 мм из углепластика толщиной 1,5 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера модели ЛК-1000-ОМ

**Fig. 12** – The image CFRP sample surface with 1.5 mm thickness and through hole 2 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the LK-1000-OM CW ytterbium fiber laser is processed



**Рис. 13** – Изображения поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 6 мм из углепластика толщиной 3 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением импульсного волоконного иттербиевого лазера модели YLPP-1-150-30-M

**Fig. 13** – The image CFRP sample surface with 3 mm thickness and through hole 6 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the YLPP-1-150-30-M pulsed ytterbium fiber laser is processed



**Рис. 14** – Изображения поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 6 мм из углепластика толщиной 3 мм со стороны входа (А) и выхода (Б) луча при обработке излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера модели ЛК-1000-ОМ

**Fig. 14** – The image CFRP sample surface with 3 mm thickness and through hole 6 mm diameter from the entrance side (A) and the exit (B) of the beam when the LK-1000-OM CW ytterbium fiber laser is processed

Точность выполнения отверстий контролировалась с помощью гладких калибров производства ЗАО ТД «ИТО-ТУЛМАШ». В табл. 3 приведены основные результаты по лазерному сверлению сквозных отверстий излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров в углепластиках толщиной 1 ÷ 3 мм.

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о возможности лазерного сверления качественных сквозных отверстий излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров в

углепластиках толщиной до 3 мм с высокой производительностью. Непрерывный волоконный иттербиевый лазер модели ЛК-1000-ОМ обеспечивает до 5 раз более высокую производительность по сравнению с импульсным лазером при обработке образцов толщиной 2 мм и более с сохранением высокого качества. Существенно повысить производительность лазерного сверления возможно при обработке массива отверстий за счет оптимизации алгоритма обработки с минимизацией длительности пауз и повышением коэффициента использования лазера.

Таблица 3

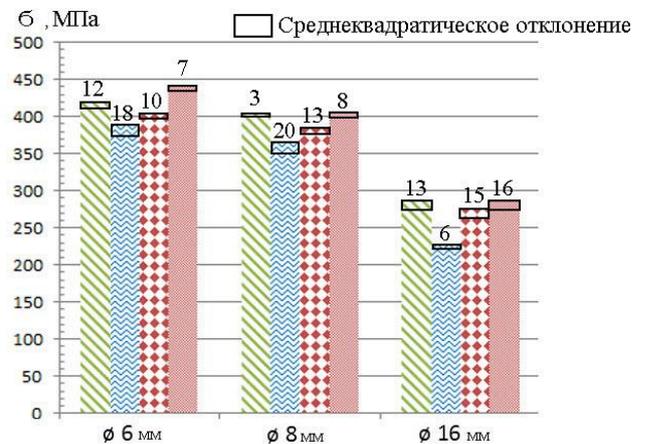
Качество и производительность лазерного сверления сквозных отверстий в углепластике толщиной 1–3 мм

Table 3

Quality and productivity of laser drilling through holes in CFRP with 1–3 mm thickness

Толщина образца, мм	Модель лазера	Диаметр отверстия, мм	ЗТВ	Точность (калитет)	Время цикла обработки отверстия, с
1	YLPM-1-4x200-20-20	6	Класс А	H11/H12	12
		8		H11	15
		16			30
1.5	YLPP-1-150-30-M	2	Класс А	H12	10
	ЛК-1000-ОМ		Класс Б		10
2	YLPP-1-150-30-M	6	Класс А	H11/H12	140
		8			150
		16			180
	ЛК-1000-ОМ	Класс Б	6	H11/H12	30
			8	55	
			16	H11	60
3	YLPP-1-150-30-M	6	Класс А	H11/H12	350
		8			360
		16			H11
	ЛК-1000-ОМ	Класс Б	6	H11/H12	45
			8	85	
			16	H11	90

Известно, что углепластики характеризуются наибольшей среди ПКМ чувствительностью к концентрации напряжений [2], а распространенным типом концентраторов напряжений являются сквозные отверстия, выполняемые механической, гидроабразивной и лазерной обработкой. В связи с этим были проведены механические испытания на прочность при растяжении образцов со сквозным отверстием толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм из углепластика марки M21/35%/T700 с ортотропной схемой армирования, формованного методом прямого прессования, в соответствии со стандартом ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766). Механическая обработка была проведена на специализированном обрабатывающем центре сверлами с алмазным покрытием серии Sandvik CoroDrill 854, гидроабразивная резка осуществлялась на установке фирмы RESATOR серии АСМ, а лазерная обработка проводилась импульсным и непрерывным волоконными итербиевыми лазерами моделей YLPP-1-150-30-M и ЛК-1000-ОМ. Каждым способом обработки было изготовлено по 5 конструктивно-подобных образцов из исследуемого углепластика с диаметром сквозных отверстий 6 мм, 8 мм и 16 мм. Испытания проводились на разрывной машине Tinius Olsen H1000KU при скорости движения траверсы 5 мм/мин.



**Рис. 15** – Диаграммы механических испытаний образцов из углепластика толщиной 3 мм при: механической (//), гидроабразивной (~~~~) и лазерной обработке (••••) – импульсный лазер модели YLPP-1-150-30-M и (■) – непрерывный лазер модели ЛК-1000-ОМ

**Fig. 15** –Diagrams of mechanical testing of samples made of carbon fiber reinforced plastic with a thickness of 3 mm with: mechanical (//), waterjet (~~~~) and laser processing (••••) –YLPP-1-150-30-M pulsed laser и (■) –ЛК-1000-ОМ continuous-wave laser)

Результаты испытаний, показали, что обработка углепластиков излучением импульсного и непрерывного волоконного иттербиевого лазера обеспечивает результат, по прочности сопоставимый с механической обработкой алмазным инструментом и до 15 % выше, чем гидроабразивная резка (рис. 15). Данные результаты были представлены в работах [66, 69].

## 7. Заключение

Конструкционные ПКМ (угле- и стеклопластики) находят все более широкое применение в ключевых отраслях современной промышленности, что ставит задачу их эффективной обработки. Лазерная обработка ПКМ является альтернативой традиционным способам – механической обработке режущим инструментом и гидроабразивной резке. Основными показателями качества детали служат дефекты макрогеометрии (ЗТВ, конусность) и микрогеометрии (шероховатость, расслоение, растрескивание) канала лазерного реза. Качественная и производительная лазерная обработка ПКМ является сложной технологической задачей вследствие высоких неоднородности и анизотропии теплофизических свойств и чувствительности материала к концентрации напряжений, вызванных дефектами обработки.

Для практического применения в промышленности лазерной резки ПКМ необходимо обеспечить следующее качество обработки: ЗТВ < 150 мкм; конусность  $u < 100$  мкм; шероховатость  $R_z \leq 40$  мкм; отсутствие таких дефектов, как расслоение и растрескивание; скорость резки  $\geq 100$  мм/мин.

Традиционный метод однопроходной газолазерной резки с использованием неактивных и инертных технологических газов характеризуется высокими точностью и производительностью, но применительно к ПКМ имеет существенный недостаток – ЗТВ  $\geq 1$  мм, что неприемлемо для практического внедрения.

На современном этапе развития технологии к перспективным методам лазерной обработки ПКМ относятся многопроходная резка и сверление с помощью промышленных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров и высокоскоростных гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой. Такое оборудование обеспечивает плотность мощности излучения в сфокусированном световом пятне до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и скорость перемещения луча до 20 м/с с точностью позиционирования до  $\pm 5$  мкм, что позволяет осуществлять послойное удаление материала в испарительном режиме за несколько проходов по внутренним и внешним контурам любой сложности с высокими качеством, точностью, производительностью и минимальными затратами.

Экспериментальные исследования по многопроходной лазерной резке и сверлению конструкционных углепластиков толщиной 1 ÷ 3 мм, проведенные на экспериментальной технологической установке на базе серийных наносекундных импульсных и непре-

рывных волоконных иттербиевых лазеров с длиной волны 1,06 мкм и мощностью излучения до 1 кВт, показывают, что при оптимальных технологических параметрах режима обработки достигается требуемое (максимальное) качество: ЗТВ < 150 мкм; конусность  $u < 100$  мкм; шероховатость  $R_z \leq 40$  мкм; отсутствие таких дефектов, как расслоение и растрескивание. Скорость резки составляет 20 ÷ 60 мм/мин при обработке импульсным излучением и 1 ÷ 3 м/мин при непрерывном. Лазерное сверление сквозных отверстий диаметром от 2 мм до 16 мм в углепластиках толщиной 1 ÷ 3 мм характеризуется высокой точностью (допуск на диаметр в соответствии с качествами Н11 и Н12), качеством: ЗТВ < 150 мкм; шероховатость  $R_z \leq 40$  мкм; расслоение и растрескивание отсутствуют, – и производительностью, сопоставимой с традиционными способами обработки.

Сравнительные механические испытания образцов из углепластика толщиной 1 мм, 2 мм и 3 мм с концентратором напряжений в виде сквозного отверстия диаметром 6 мм, 8 мм или 16 мм в соответствии со стандартом ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766) показали, что обработка излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров обеспечивает результат, по прочности сопоставимый с механической обработкой алмазным инструментом и на  $\approx 15$  % выше, чем гидроабразивная резка. Представленные результаты подтверждают возможность производительной прецизионной лазерной обработки ПКМ в промышленности как альтернативы традиционным способам.

## Список литературы

- [1] Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике [Текст] / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 720 с.
- [2] Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты [Текст] / К.Е. Перепелкин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 380 стр.
- [3] Находкин, П.А. «Черные крылья» готовятся к полетам [Текст] / П.А. Находкин // Авиаиндустрия. – 2011. – № 2. – С. 42–47.
- [4] Савин, С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 [Текст] / С.П. Савин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 686–693.
- [5] Irving, P.E. Polymer Composites in the Aerospace Industry [Text] / P.E Irving, C. Soutis. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2015. – 520 p.
- [6] Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы [Текст] / Ю.А. Ми



хайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.

[7] Средне-Невский судостроительный завод [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://snsz.ru>. – СНСЗ. – (Дата обращения 13.03.2018)

[8] Композитное кораблестроение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://compositeshipbuilding.ru>. – Композитное кораблестроение. – (Дата обращения 13.03.2018)

[9] АПАТЕК-Прикладные и перспективные технологии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.apatech.ru>. – АПАТЕК. – (Дата обращения 13.03.2018)

[10] АВАНГАРД. Проектирование и производство изделий из стеклопластика, полимерных и композиционных материалов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.авангард-пластик.рф>. – АВАНГАРД. – (Дата обращения 13.03.2018)

[11] ОНПП Технология им. А.Г. Ромашина [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://technologiya.ru>. – Государственный научный центр РФ. – (Дата обращения 13.03.2018)

[12] Раскутин, А.Е. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций [Текст] / А.Е. Раскутин, А.В. Хрульков, Р.И. Гирш // Труды ВИ-АМ. – 2016. – № 9. – С. 106–118.

[13] Jamal Y., Sheikh-Ahmad Machining of Polymer Composites [Text] / Sheikh-Ahmad Jamal Y. – Berlin: Springer, 2009. – 315 p.

[14] Панов, Д.В. Композиты и станки для их обработки [Текст] / Д.В. Панов, А.Н. Коротков, Б.П. Саушкин // РИТМ. – 2014. – № 7. – С. 32–36.

[15] Комаров, Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов [Текст] / Г.В. Комаров. – СПб.: Профессия, 2006. – 592 с.

[16] Григорьянц, А.Г. Особенности лазерной резки углепластиков [Текст] / А.Г. Григорьянц [и др.] // Сварочное производство. – 1991. – № 5. – С. 4–6.

[17] Григорьянц, А.Г. Лазерная обработка неметаллических материалов [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – М.: Высшая школа, 1988. – 191 с.

[18] Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664 с.

[19] Emmelmann, C. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength / C. Emmelman [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – Part A. – P. 565–571.

[20] Stock, J. Remote laser cutting of CFRP: Improvements in the cut surface [Text] / J. Stock, M. Zaeh, M. Conrad // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 161–170.

[21] Гуреев, Д.М. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов [Текст] / Д.М. Гуреев, С.И. Кузнецов, А.Л. Петров // Известия Самарского

научного центра Российской академии наук. – 1999. – № 2. – С. 255–264.

[22] Herzog, D. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP [Text] / D. Herzog [et. al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2008. – Vol. 48. – P. 1464–1473.

[23] Wolynski, A. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR [Text] / A. Wolynski [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – P. 292–301.

[24] Takahashi, K. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light [Text] / K. Takahashi [et. al.] // Composites: Part A applied science and manufacturing. – 2016. – Vol. 84. – P. 114–122.

[25] Caprino, G. Maximum cutting speed in laser cutting of fiber reinforced plastics [Text] / G. Caprino, V. Tagliaferri // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1988. – Vol. 48. – No. 4. – P. 389–398.

[26] Cenna, A.A. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics – a review [Text] / A. A. Cenna, P. Methew // Int. J. Mach. Tools Manufacture. – 1997. – Vol. 37 (6). – P. 723–736.

[27] Negarestani, R. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials / R. Negarestani // Negarestani R. Machining Technology for Composite Materials [Text] / R. Negarestani, L. Li. – Cambridge, 2012. – P. 288–308.

[28] Laser machining of carbon fibre-reinforced plastic composites // Advances in laser materials processing [Text] / Z. L. Li [et al.]. – Cambridge, 2010. – P. 136–177.

[29] Chryssolouris, G. Fundamentals of laser machining of composites / G. Chryssolouris // Chryssolouris, G. Machining Technology for Composite Materials [Text] / G. Chryssolouris, K. Salonitis. – Cambridge, 2012. – P. 266–287.

[30] Тарасов, В.А. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике [Текст] / В.А. Тарасов, А.Л. Галиновский // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 3. – С. 1–12.

[31] Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 6. – С. 11–17.

[32] Степанов, Ю.С. Раскрой листовых неметаллических материалов водоледяной струей высокого давления [Текст] / Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 8. – С. 23–28.

[33] Матюшев, И.И. Справочник конструктора / И.И. Матюшев. – СПб.: Политехника, 2006. – 1027 с.

[34] Серебrenицкий, П.П. Краткий справочник технолога-машиностроителя / П.П. Серебrenицкий. – СПб.: Политехника, 2007. – 951 с.



- [35] Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев. – Т.1. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.
- [36] Wu, C. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes [Text] / C. Wu, X. Wu, C. Huang // Optics and laser technology. – 2015. – Vol. 73. – P. 23–28.
- [37] Ushida, K. Characteristic analysis of CFRP cutting with nanosecond pulsed laser [Text] / K. Ushida [et al.] // Journal of advanced research in physics. – 2012. – Vol. 3. – No. 1. – P. 1–3.
- [38] Bluemel, S. Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources [Text] / S. Bluemel [et al.] // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1143–1152.
- [39] Riveiro, A. Experimental study on the CO<sub>2</sub> laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite [Text] / A. Riveiro [et al.] // Composite Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2012. – Vol. 43. – P. 1400–1409.
- [40] Leone, C. Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique [Text] / C. Leone, S. Genna, V. Tagliaferri // Optics and lasers in engineering. – 2014. – Vol. 53. – P. 43–50.
- [41] Voisey, K.T. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites [Text] / K.T. Voisey [et al.] // Optics and lasers in engineering. – 2006. – Vol. 44. – Iss. 11. – P. 1185–1197.
- [42] Schneider, F. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers [Text] / F. Schneider, N. Wolf, D. Petring // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 415–420.
- [43] Goeke, A. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality [Text] / A. Goeke, C. Emmelmann // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – Part B. – P. 253–258.
- [44] Takahashi, K. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser [Text] / K. Takahashi [et al.] // Journal of materials processing technology. – 2015. – Vol. 222. – P. 110–121.
- [45] Leone, C. Investigation of CFRP laser milling using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser: Effect of process parameters on removal mechanisms and HAZ formation [Text] / C. Leone [et al.] // Composite Part A: Applied science and manufacturing. – 2013. – Vol. 55. – P. 129–142.
- [46] Klotzbach, A. Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources [Text] / A. Klotzbach, M. Hauser, E. Beyer // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. Part A. – P. 572–577.
- [47] Niino, H. Laser cutting of carbon fiber reinforced thermos-plastic (CFRTP) by IR laser Irradiation [Text] / H. Niino [et al.] // Journal of laser Micro/Nanoengineering. – 2014. – Vol. 9. – No. 2. – P. 180–186.
- [48] Lima, M. Laser processing of carbon fiber reinforced polymer composite for optical fiber guidelines [Text] / M. Lima [et al.] // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 572–580.
- [49] Akshay, H. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling [Text] / H. Akshay [et al.] // Composite Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2016. – Vol. 82. – P. 42–52.
- [50] Furst, A. Remote laser processing of composite materials with different opto-thermic properties [Text] / A. Furst [et al.] // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 389–398.
- [51] Dittmar, H. UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses [Text] / H. Dittmar, F. Gabler, U. Stute // Physics Procedia. – 2013. – Vol. 41. – P. 266–275.
- [52] Технологические рекомендации «Лазерная резка полимерных композиционных материалов и металлокомпозиционных материалов». №1.4.2272-2012. – Введен. 2012-07-01. – Национальный Институт Авиационных Технологий, 2012. – 21 с.
- [53] Zaeh, M. Material processing with remote technology – revolution or Evolution / M. Zaeh [et al.] // Physics Procedia. – 2010. – Vol. 5. – Part A. – P. 19–33.
- [54] Промышленные волоконные иттербиевые лазеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ipgphotonics.com/ru>. – Лазеры. – (Дата обращения: 13.03.2018).
- [55] Вейко, В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение [Текст] / В.П. Вейко. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.
- [56] Вакс, Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки [Текст] / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
- [57] Weber, R. Minimum damage in CFRP laser processing [Text] / R. Weber [et al.] // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – Part B. – P. 302–307.
- [58] Weber, R. Short-pulse laser processing of CFRP [Text] / R. Weber [et al.] // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 39. – P. 137–146.
- [59] Mucha, P. Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP [Text] / P. Mucha [et al.] // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1208–1217.
- [60] Ohkubo, T. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics [Text] / T. Ohkubo, M. Tsukamoto, Y. Sato // Physics Procedia. – 2014. – Vol. 56. – P. 1165–1170.
- [61] Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems\\_simulation\\_of\\_composites.pdf](http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf). – (Дата обращения: 14.03.2018).
- [62] Xu, H. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing [Text] / H. Xu, J. Hu // Physics Procedia. – 2017. – Vol. 45. – P. 354–364.
- [63] Okhubo, T. Three-dimensional numerical simulation during laser processing of CFRP [Text] / T. Okhubo [et al.] // Applied surface science. – 2017. – Vol. 417. – P. 104–107.
- [64] Котов, С.А. Экспериментальная оценка режимов размерной обработки углепластиков им-



пульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / С.А. Котов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2017. – № 1. – С. 73–85.

[65] Экспериментальное исследование влияния технологического газа на качество обработки углепластиков наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] // Лазеры в науке, технике, медицине / С.А. Котов; под ред. В.А. Петрова. – М., 2016. – Т. 27. – С. 27–31.

[66] Котов, С.А. Зависимость качества детали из терморезистивного углепластика от вида обработки [Текст] / С.А. Котов, В.В. Блинков, Д.И. Кондратюк // Авиационная промышленность. – 2016. – № 4. – С. 43–47.

[67] Котов, С.А. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / С.А. Котов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 1. – С. 30–36.

[68] Котов, С.А. Экспериментальное исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффективность размерной обработки углепластика [Текст] / С.А. Котов, Н.А. Лябин // Вестник НИЯУ «МИФИ». – 2017. – Т. 6. – № 5. – С. 396–404.

[69] Котов, С.А. Качество и оценка эффективности размерной обработки углепластиков излучением волоконных лазеров [Текст] / С.А. Котов [и др.] // Авиационная промышленность. – 2017. – № 3. – С. 42–47.

[70] Технология многопроходной обработки углепластика импульсным наносекундным волоконным иттербиевым лазером // Лазеры в науке, технике, медицине [Текст] / С.А. Котов [и др.]; под ред. В.А. Петрова. – М., 2017. – Т. 28. – С. 33–37.

[71] Григорьянц, А.Г. Научно-техническая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера [Текст] / А.Г. Григорьянц [и др.] // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – № 11. – С. 33–39.

## References

[1] Mikhailin Yu. A. Fibrous Polymer Composite Materials in Technology (Voloknistye polimernye kompozitsionnye materialy v tekhnike). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2015 (in Russ.).

[2] Perepelkin K.E. Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites (Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2015 (in Russ.).

[3] Nakhodkin P.A. “Black wings” are preparing for flights (“Chernye kryl'ya” gotovyatsya k poletam). *Aviaindustriya*, 2013;2:42–47 (in Russ.).

[4] Savin S.P. The use of modern polymer composite materials in the design of the airframe of the MS-21 air-

craft (Primenenie sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov v konstruksii planera samoletov semeistva MS-21). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012;14(4):686–693 (in Russ.).

[5] Irving P.E., Soutis C. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2015.

[6] Mikhailin Yu.A. Structural polymer composite materials (Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy). SPb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2010 (in Russ.).

[7] Sredne-Neviskii sudostroitel'nyi zavod [E-recourse]. Available on: <http://snsz.ru>. – SNSZ (13.03.2018)

[8] Kompozitnoe korablestroenie [E-recourse]. Available on: <http://compositeshipbuilding.ru>. – Kompozitnoe korablestroenie (13.03.2018)

[9] APATEK-Prikladnye i perspektivnye tekhnologii [E-recourse]. Available on: <http://www.apatech.ru>. – APATEK (13.03.2018)

[10] AVANGARD. Proektirovanie i proizvodstvo izdelii iz stekloplastika, polimernykh i kompozitsionnykh materialov [E-recourse]. Available on: <http://www.avangard-plastik.rf>. – AVANGARD (13.03.2018)

[11] ONPP Tekhnologiya im. A.G. Romashina [E-recourse]. Available on: <https://tehnologiya.ru>. – Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr RF (13.03.2018)

[12] Raskutin A.E. Technological features of machining of composite materials in the manufacture of structural parts (Tekhnologicheskie osobennosti mekhanoo obrabotki kompozitsionnykh materialov pri izgotovlenii detalei konstruksii). *Trudy VIAM*, 2016;9:106–118 (in Russ.).

[13] Jamal Y., Sheikh-Ahmad. *Machining of Polymer Composites*. Berlin: Springer, 2009

[14] Panov D.V., Korotkov A. N., Saushkin B. P. Composites and machines for their processing (Kompozity i stanki dlya ikh obrabotki). *RITM*, 2014;7:32–36 (in Russ.).

[15] Komarov G.V. Connecting parts from polymer materials (Soedinenie detalei iz polimernykh materialov). SPb.: Professiya Publ., 2006 (in Russ.).

[16] Grigor'yants A.G., Kryukov V.G., Savchuk A.N., Budanov A.D., Trubitsyn A.V. Features of laser cutting of carbon plastics (Osobennosti lazernoi rezki ugleplastikov). *Svarochnoe proizvodstvo*, 1991;5:4–6 (in Russ.).

[17] Grigor'yants A.G., Sokolov A. A. Laser processing of nonmetallic materials (Lazernaya obrabotka nemetallicheskih materialov). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988 (in Russ.).

[18] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Technological processes of laser processing (Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki). Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2008 (in Russ.).



- [19] Emmelmann C. [et al.]. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength. *Physics Procedia*, 2011;12(A):565–571.
- [20] Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote laser cutting of CFRP: Improvements in the cut surface. *Physics Procedia*, 2012;39:161–170.
- [21] Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L. Laser cutting of carbon composite materials (Lazernyi raskroi uglerodnykh kompozitsionnykh materialov). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 1999;2:255–264 (in Russ.).
- [22] Herzog D. [et al.]. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008;48:1464–1473.
- [23] Wolynski A. [et al.]. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia*, 2011;12:292–301.
- [24] Takahashi K. [et al.]. Heat conduction analysis of laser CFRP processing with IR and UV laser light. *Composites: Part A applied science and manufacturing*, 2016;84:114–122.
- [25] Caprino G., Tagliaferri V. Maximum cutting speed in laser cutting of fiber reinforced plastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1988;48(4):389–398.
- [26] Cenna A.A., Methew P. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics—a review. *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, 1997;37(6):723–736.
- [27] Negarestani R., Li L. Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials / R. Negarestani // Negarestani R. *Machining Technology for Composite Materials*. Cambridge, 2012, pp. 288–308.
- [28] Li Z.L. [et al.]. Laser machining of carbon fibre-reinforced plastic composites // *Advances in laser materials processing* / Cambridge, 2010, pp. 136–177.
- [29] Chryssolouris G., Salonitis K. *Fundamentals of laser machining of composites*. Machining Technology for Composite Materials. – Cambridge, 2012, pp. 266–287.
- [30] Tarasov V.A., Galinovskii A.L. Problems and prospects for the development of hydrojet technologies in rocket and space technology (Problemy i perspektivy razvitiya gidrostruinykh tekhnologii v raketno-kosmicheskoi tekhnike). *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013;3:1–12 (in Russ.).
- [31] Stepanov Yu.S., Barsukov G.V., Alyushin E.G. Modern technologies of hydro- and hydroabrasive processing of blanks (Sovremennye tekhnologii gidro- i gidroabrazivnoi obrabotki zagotovok). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2012;6:11–17 (in Russ.).
- [32] Stepanov Yu.S., Burnashov M.A. Cutting sheet nonmetallic materials with a high-pressure water jet (Raskroi listovykh nemetallicheskiikh materialov vodoleyanoi struei vysokogo davleniya). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2014;8:23–28 (in Russ.).
- [33] Matyushev I.I. Reference book of the designer (Spravochnik konstruktora). SPb.: Politekhnik Publ, 2006, 1027 p. (in Russ.).
- [34] Serebrenitskii P.P. A brief reference book of the technologist-machine builder (Kratkii spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya). SPb.: Politekhnik Publ., 2007 (in Russ.).
- [35] Anur'ev V.I. Handbook of the designer-machine builder (Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya). Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001 (in Russ.).
- [36] Wu C., Wu X., Huang C. Ablation behaviors of carbon reinforced polymer composites by laser of different operation modes. *Optics and laser technology*, 2015;73:23–28.
- [37] Ushida K. [et al.]. Characteristic analysis of CFRP cutting with nanosecond pulsed laser. *Journal of advanced research in physics*, 2012;3(1):1–3.
- [38] Bluemel S. [et al.]. Comparative study of achievable quality cutting carbon fibre reinforced thermoplastics using continuous wave and pulsed laser sources. *Physics Procedia*, 2014;56:1143–1152.
- [39] Riveiro A. [et al.]. Experimental study on the CO<sub>2</sub> laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012;43:1400–1409.
- [40] Leone C., Genna S., Tagliaferri V. Fibre laser cutting of CFRP thin sheets by multi-passes scan technique. *Optics and lasers in engineering*, 2014;53:43–50.
- [41] Voisey K.T. [et al.]. Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites. *Optics and lasers in engineering*, 2006;44(11):1185–1197.
- [42] Schneider F., Wolf N., Petring D. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with cw- and pulsed lasers. *Physics Procedia*, 2013;41:415–420.
- [43] Goeke A., Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*, 2010;5(B):253–258.
- [44] Takahashi K. [et al.]. Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser. *Journal of materials processing technology*, 2015;222:110–121.
- [45] Leone C. [et al.]. Investigation of CFRP laser milling using a 30 W Q-switched Yb:YAG fiber laser: Effect of process parameters on removal mechanisms and HAZ formation. *Composite Part A: Applied science and manufacturing*, 2013;55:129–142.
- [46] Klotzbach A., Hauser M., Beyer E. Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources. *Physics Procedia*, 2011;12(A):572–577.
- [47] Niino H. [et al.]. Laser cutting of carbon fiber reinforced thermos-plastic (CFRTP) by IR laser Irradiation. *Journal of laser Micro/Nanoengineering*, 2014;9(2):180–186.
- [48] Lima M. [et al.]. Laser processing of carbon fiber reinforced polymer composite for optical fiber guidelines. *Physics Procedia*, 2013;41:572–580.
- [49] Akshay H. [et al.]. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016;82:42–52.



[50] Furst A. [et al.]. Remote laser processing of composite materials with different opto-thermic properties. *Physics Procedia*, 2013;41:P389–398.

[51] Dittmar H., Gabler F., Stute U. UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses. *Physics Procedia*, 2013;41:266–275.

[52] Tekhnologicheskie rekomendatsii “Lazernaya rezka polimernykh kompozitsionnykh materialov i metallokompozitsionnykh materialov”. No. 1.4.2272-2012. – Vveden. 2012-07-01. Natsional'nyi Institut Aviatsonnykh Tekhnologii Publ., 2012.

[53] Zaeh M. [et al.]. Material processing with remote technology—revolution or Evolution. *Physics Procedia*, 2010;5(part A):19–33.

[54] Promyshlennye volokonnye itterbievye lazery [E-recourse]. Available on: <http://www.ipgphotonics.com/ru>. – Lazery (13.03.2018).

[55] Veiko V.P. Technological lasers and laser radiation (Tekhnologicheskie lazery i lazernoe izluchenie). SPb: SPbGU ITMO Publ., 2007. (in Russ.).

[56] Vaks E.D., Milen'kii M.N., Saprykin L.G. The practice of precision laser processing (Praktika pretsizionnoi lazernoi obrabotki). Moscow: Tekhnosfera Publ., 2013 (in Russ.).

[57] Weber R. [et al.]. Minimum damage in CFRP laser processing. *Physics Procedia*, 2011;12(B):302–307.

[58] Weber R. [et al.]. Short-pulse laser processing of CFRP. *Physics Procedia*, 2012;39:137–146.

[59] Mucha P. [et al.] Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP. *Physics Procedia*, 2014;56:1208–1217.

[60] Ohkubo T., Tsukamoto M., Sato Y. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics. *Physics Procedia*, 2014;56:1165–1170.

[61] Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics [E-recourse]. Available on: [http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems\\_simulation\\_of\\_composites.pdf](http://www.scansonic.de/files/publikationen/nafems_simulation_of_composites.pdf) (14.03.2018).

[62] Xu H., Hu J. Modeling of the material removal and heat affected zone formation in CFRP short pulsed laser processing. *Physics Procedia*, 2017;45:354–364.

[63] Okhubo T. [et al.]. Three-dimensional numerical simulation during laser processing of CFRP. *Applied surface science*, 2017;417:104–107.

[64] Kotov S.A., Lyabin N.A., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I., Bibik O.B., Popov D.S. Experimental evaluation of the regimes of dimensional processing of carbon plastics by pulsed nanosecond radiation of an ytterbium fiber laser (Eksperimental'naya otsenka rezhimov razmernoi obrabotki ugleplastikov impul'snym nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo

lazera). *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya “Mashinostroenie”*, 2017;1:73–85 (in Russ.).

[65] Kotov S. A. Experimental study of the effect of process gas on the quality of processing of carbon plastics by nanosecond radiation from a fiber ytterbium laser (Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya tekhnologicheskogo gaza na kachestvo obrabotki ugleplastikov nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera). *Lazery v Nauke, Tekhnike, Meditsine*, 2016;27:27–31 (in Russ.).

[66] Kotov S.A., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I. Dependence of the quality of the part from thermosetting carbon fiber reinforced plastic on the type of processing (Zavisimost' kachestva detali iz termoreaktivnogo ugleplastika ot vida obrabotki). *Aviatsonnaya promyshlennost'*, 2016;4:43–47 (in Russ.).

[67] Kotov S.A. High technology of increasing the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by pulsed nanosecond radiation from a fiber ytterbium laser (Naukoemkaya tekhnologiya povysheniya effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov impul'snym nanosekundnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera). *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2017;1:30–36 (in Russ.).

[68] Kotov S.A., Lyabin N.A. Experimental study of the influence of the wavelength of laser radiation on the efficiency of dimensional processing of CFRP (Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya dliny volny lazernogo izlucheniya na effektivnost' razmernoi obrabotki ugleplastika). *Vestnik NIYaU “MIFI”*, 2017;6(5):396–404 (in Russ.).

[69] Kotov S.A., Popov D.S., Blinkov V.V., Kondratyuk D.I. Quality and evaluation of the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by radiation from fiber lasers (Kachestvo i otsenka effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov izlucheniem volokonnykh lazerov). *Aviatsonnaya promyshlennost'*, 2017;3:42–47 (in Russ.).

[70] Kotov S.A., Antonenko V.I., Popov D.S. Technology of multi-pass processing of CFRP by a pulsed nanosecond fiber ytterbium laser (Tekhnologiya mnogopokhodnoi obrabotki ugleplastika impul'snym nanosekundnym volokonnyim itterbievym lazerom). *Lazery v Nauke, Tekhnike, Meditsine*, 2017;28:33–37 (in Russ.).

[71] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Infimovskii Yu.Yu., Blinkov V.V., Kotov S.A. High technology of increasing the efficiency of dimensional processing of carbon plastics by the continuous emission of a fiber ytterbium laser (Naukoemkaya tekhnologiya povysheniya effektivnosti razmernoi obrabotki ugleplastikov nepreryvnym izlucheniem volokonno go itterbievogo lazera), *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2017;11:33–39 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

