

УДК 535.621.37; 621.378.325
DOI: 10.12737/24210

С.А. Котов, ведущий инженер

(ООО НТО «ИРЭ-Полус»; 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д. 1, стр. 3)

E-mail: skotov@ntoire-polus.ru

Научная технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера

На основе большого объема экспериментальных исследований по размерной обработке углепластиков с разной структурой исполнения и толщиной 1 мм импульсным излучением волоконного иттербиевого лазера были определены технологические параметры обработки, позволяющие обеспечивать допустимую зону термического влияния и геометрию канала реза. Проведена теоретическая оценка зоны термического влияния по модели мгновенного нормально-распределенного источника излучения.

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

S.A. Kotov, Principal engineer

(STC "IRE-Pole"; Building 3, 1, Academician Vernadsky Square, Fryazino, Moscow Region 141190)

High technology for efficiency increase of dimensional treatment of carbon plastics with pulse nano-second emission of fiber ytterbium laser

In this work there are shown results of the complex theoretical and experimental investigation of laser dimensional treatment of different types of carbon plastics with the thickness of 1mm with the matrix on the base of thermosetting binding agents. In the course of this work fulfillment there was developed an experimental plant on the basis of a pulse nano-second fiber laser of type YLPM-1-4x200-20-20 with the wave length of 1.06 μm and average radiated power of 20 W.

The theoretical assessment of a thermal impact area is carried out on a model of an instantaneously operating normally distributed circular source on the surface of a semi-infinite body. In accordance with the assessment given there are formulated recommendations for a choice of definite technological parameters of machining conditions directed to the decrease of a thermal impact area and increase of processing speed.

In the course of experimental researches a laser source operated with a maximum average power, beam scanning was carried out by a two-axial galvano-scanner. The experiments were carried out without technological gas supply in an environment at different speeds of beam scanning, laser operating modes, passes number, hatch distances and positions of a focusing plane. The area of a thermal impact and geometry of a cut slot were analyzed with the aid of an optic and electronic microscope and a contour-graph. The work result is recommendations for a choice of technological parameters and an algorithm of processing at which the area of thermal impact is less than 150 μm ; taper of a cut slot is less than 100 μm ; there are no defects on a surface and a cross profile of the cut slot section; a high speed of processing is achieved.

Keywords: pulse fiber ytterbium laser; laser treatment; area of thermal impact; polymeric composite materials; carbon plastics.

Углепластики являются волокнистыми полимерными композитными материалами (ВПКМ), в которых в качестве армирующего волокнистого наполнителя (АВН) используются углеродные и графитизированные во-

локна, нити, ленты, ткани различной текстуры, а в качестве связующей матрицы – термоактивные или термопластичные пластики на основе эпоксидных, имидных, фенольных и других смол. Углепластики относятся к клю-

чевым материалам для легковесных конструкций, все более широко применяемых в авиации, автомобилестроении, машиностроении, производстве космической и медицинской техники и других отраслях [1].

При производстве изделий из углепластиков на финальном этапе изготовления применяются контурная резка и сверление сквозных отверстий, предназначенных для крепежных

элементов. Данные операции выполняются традиционными способами обработки и при помощи лазерной обработки, обеспечивающей высокую производительность, отсутствие механического воздействия на материал и износ инструмента.

Основные факторы, влияющие на качество детали при лазерной обработке [2], показаны на рис. 1.

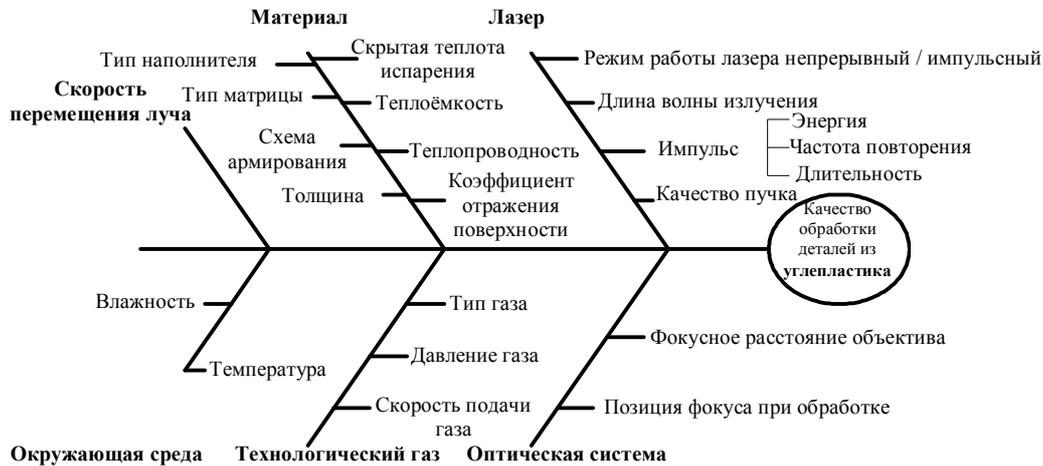


Рис. 1. Диаграмма факторов, влияющих на качество изготовления деталей из углепластиков при лазерной обработке

Основной технологической проблемой при лазерной обработке является образование зоны термического влияния (ЗТВ), в которой нарушается прочность сцепления углеродных волокон наполнителя со связующей матрицей, что приводит к снижению упругопрочностных свойств.

ЗТВ образуется вследствие того, что из-за высокой теплопроводности углеродного волокна (на 1–2 порядка больше, чем у матрицы) и низкой температурой повреждения матрицы (на порядок ниже, чем температура испарения углеродного волокна) часть энергии лазерного излучения рассеивается в материале вне канала реза, вызывая термодеструкцию матрицы. Поэтому для достижения высокого качества лазерной обработки углепластиков возникает необходимость проведения комплекса экспериментальных и теоретических исследований по определению алгоритма и технологических параметров режима обработки.

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка на основе наносекундного импульсного иттербиевого волоконного лазера мод. YLRM-1-4x200-20-20 производства НТО «ИРЭ-Полнос», ее структурная схема показана на рис. 2.

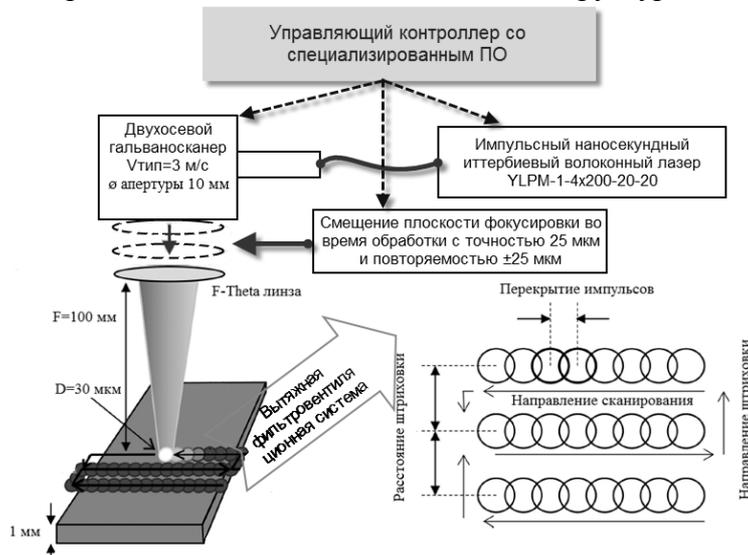


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Типовые режимы работы используемого лазера приведены в табл. 1.

1. Параметры типовых режимов работы иттербиевого волоконного лазера модели YLRM-1-4x200-20-20

Режима работы лазера	Средняя мощность излучения, Вт	Частота следования импульсов, кГц	Длительность импульса (по полувысоте), нс	Энергия в импульсе, мДж
T8	20	20	200	1
T7		40	100	0,5
T6		60	50	0,33
T5		85	30	0,23
T4		105	20	0,19
T3		125	14	0,16
T2		200	8	0,1
T1		500	4	0,04

В работе в качестве исследуемого материала использовались терморезистивные углепластики, указанные в табл. 2.

Типовые теплофизические свойства термо-

реактивной связующей матрицы на основе эпоксидной смолы и АВН углепластика приведены в табл. 3 [3].

Выбор модели лазера и оптической системы был обусловлен необходимостью обеспечения плотности мощности в сфокусированном пятне лазерного излучения, достаточной для испарения материала, и короткого времени взаимодействия излучения с веществом для уменьшения ЗТВ.

В работе [4] пороговая плотность мощности $q_{\text{пор}}$, необходимая для импульсного нагрева поверхности до температуры испарения T_v , оценивается по формуле

$$q_{\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T_v - T_n) \cdot \kappa \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot A \cdot \sqrt{\chi \cdot \tau}} \quad (1)$$

где T_n – начальная температура материала, К; κ – теплопроводность, Вт/(м·К); A – коэффициент поглощения излучения; χ – коэффициент температуропроводности м²/с; τ – длительность импульса излучения, с.

2. Технологические характеристики исследуемых образцов материала

№ образца	Марка материала	Число слоев	Толщина, мм	Схема армирования	Метод изготовления
1	M21/35%/134/T700/300	8	1,0	$(0^0, 90^0, 0^0, 90^0)_s$	Прессование
2	M21/35%/134/T700/300			$(0^0, 90^0, 0^0, 90^0)_s$	Вакуумное формование
3	M21/35%/134/T700/300			$(0^0, \pm 45^0, 90^0)_s$	Прессование
4	M21/35%/134/T700/300			$(0^0, \pm 45^0, 90^0)_s$	Вакуумное формование
5	5320-1/T650/3K/42''	5		$(0^0)_5$	Прессование
6	5320-1/T650/3K/42''			$(0^0)_5$	Вакуумное формование

3. Теплофизические параметры материала матрицы и АВН углепластика

Наименование параметра	Матрица	Волокно в направлении параллельном/перпендикулярном оси волокна
Плотность ρ , кг/м ³	1250	1850
Теплопроводность κ , Вт/(м·К)	0,2	50/5
Теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	1200	710
Температура диспергирования/испарения T_v , К	800	3900
Энергия активации процесса термодеструкции/скрытая теплота испарения L_v , кДж/кг	1000	43000
Температура повреждения структуры, К	450	3000
Коэффициент поглощения излучения при падении под прямым углом A , %	н/д	83,7

Расчет по данной формуле показал, что с учетом параметров материала и источника излучения (см. табл. 2 и 3) необходимо обеспечить уровень плотности мощности не менее 10^7 Вт/см².

Оценка диаметра сфокусированного пятна излучения, обеспечиваемого экспериментальной установкой, осуществлялась по формуле [5]

$$d = \frac{4 \cdot \pi}{\pi \cdot D} \cdot M^2 \cdot f = 30 \text{ мкм}, \quad (2)$$

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

$$2 \cdot z_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \lambda} = 14 \text{ мм}. \quad (3)$$

Оценка плотности мощности излучения в фокусе определялась по формуле

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

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность лазерного излучения, Вт; $f_{\text{имп}}$ – частота следования импульсов, Гц; $\tau_{\text{имп}}$ – длительность импульсов, с; S – площадь сфокусированного пятна, см².

Расчет показал, что во всех режимах работы лазера плотность мощности находится на уровне 10^9 Вт/см². Данной плотности мощности излучения, обеспечиваемой экспериментальной установкой, достаточно для обработки углепластиков.

Методика оценки качества обработки

Факторы, определяющие качество детали из углепластика при лазерной обработке, делятся на три категории [2, 6] (рис. 3).

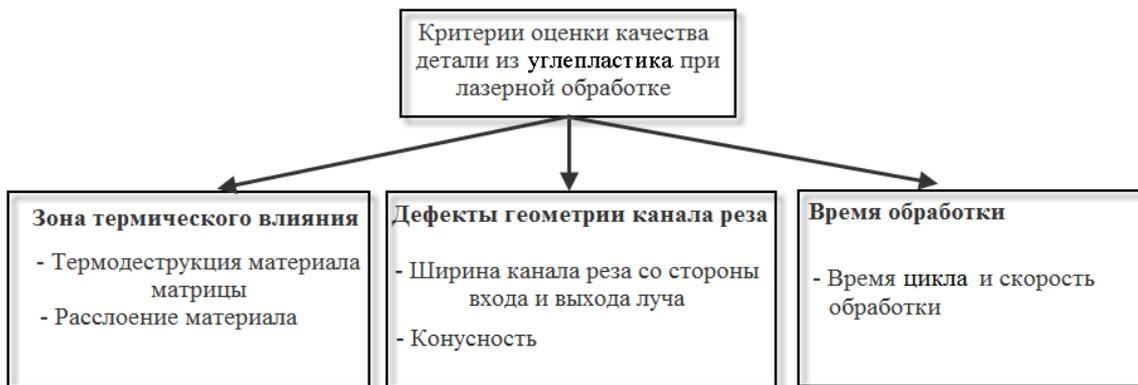


Рис. 3. Критерии оценки качества деталей из углепластика при лазерной обработке

Значение ширины ЗТВ вычисляется как $W_{\text{ЗТВ}} = S_{\text{ЗТВ}}/L_{\text{реза}}$, где $S_{\text{ЗТВ}}$ – площадь зоны полной термодеструкции матрицы со стороны входа луча, ограниченной длиной реза $L_{\text{реза}}$.

По оценке ЗТВ принято определять три класса качества деталей при лазерной обработке:

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

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

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

При изготовлении сквозных отверстий по классу точности – «Точный» в соответствии с

ГОСТ 30893.1–2003 требуется, чтобы размер отверстий (диаметр) удовлетворял требованиям качества Н12. Поэтому конусность канала реза не должна превышать 100 мкм.

Оценка ширины канала реза и ЗТВ на поверхности образца со стороны входа и выхода луча проводилась при помощи оптического микроскопа Olympus GX-51. Внутренние дефекты (расслоение материала, термодеструкция матрицы, поры) исследовались на микрошлифе поперечного сечения канала реза этим же микроскопом. Измерение поперечного профиля поверхности канала реза (конусности) проводилось с помощью контурографа Mitutoyo Contracer CV-2100. Исследование поверхности канала реза, с целью определения наличия дефектов (термодеструкция матрицы, трещины, поры), проводилось на электронном сканирующем микроскопе ZEISS GEMINI MERLIN COMPACT VP-60-13.

Теоретическая оценка ЗТВ с помощью модели мгновенного нормально распределенного импульсного источника излучения

Специфической особенностью импульсного нагрева твёрдых тел высококонцентрированными источниками энергии является то, что в области высоких температур на тепловое поле в большей степени оказывают влияние особенности режима ввода энергии и в меньшей степени граничные условия и теплофизические параметры материала. Данная особенность позволяет остаться в рамках аналитических решений уравнения теплопроводности при оценке ширины ЗТВ, возникающей при лазерном раскрое углепластиков излучением импульсного лазера.

Для оценки ширины ЗТВ было выбрано аналитическое решение для модели мгновенно действующего нормально-распределённого кругового источника на поверхности полубесконечного тела [7]. Решение данной задачи позволило сократить объем экспериментальной работы и сосредоточить поиск на наиболее перспективных режимах работы лазера.

Применение данной модели, по мнению авторов, в наибольшей мере соответствует теплофизике процесса, когда отвод тепла от зоны реза осуществляется именно механизмом теплопроводности. Допущение по выбору модели мгновенно действующего источника также достаточно соответствует тому факту, что длительность импульса лазерного излучения в большинстве режимов работы лазера более чем на два порядка меньше паузы между двумя последовательными импульсами (см. табл. 1).

Температурное поле в материале, в рамках выбранной модели, представляет собой следующую зависимость:

$$T(r, z, t) - T_0 = \frac{Q \cdot A}{c_p \rho} \times \left(\frac{1}{4\pi\chi(t + t_0)} \exp\left(-\frac{r^2}{4\chi(t + t_0)}\right) \right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi\chi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\chi t}\right) \right), \quad (5)$$

где $r^2 = x^2 + y^2$ – положение в системе координат относительно центра сфокусированного пятна излучения, мкм; T_0 – температура окружающей среды, К; Q – энергия одного импульса излучения, Дж; c_p – теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; χ – коэффициент температуропроводности, м²/с; C – коэффициент сосредоточенности нормально распределенного кругового источника, 1/м²; A – коэффициент поглощения излучения; $t_0 = 1/(4\chi C)$.

В связи тем, что матрица обладает на два порядка меньшим коэффициентом теплопроводности по сравнению с углеродным волокном и энергия активации процесса термодеструкции полимерной матрицы на порядок меньше, чем скрытая теплота испарения АВН, расчет температурного поля в материале был проведен по теплофизическим параметрам АВН (см. табл. 3) [8, 9].

Результаты расчётов, при значении теплопроводности АВН – 50 Вт/(м·К), приведены на рис. 4, 5.

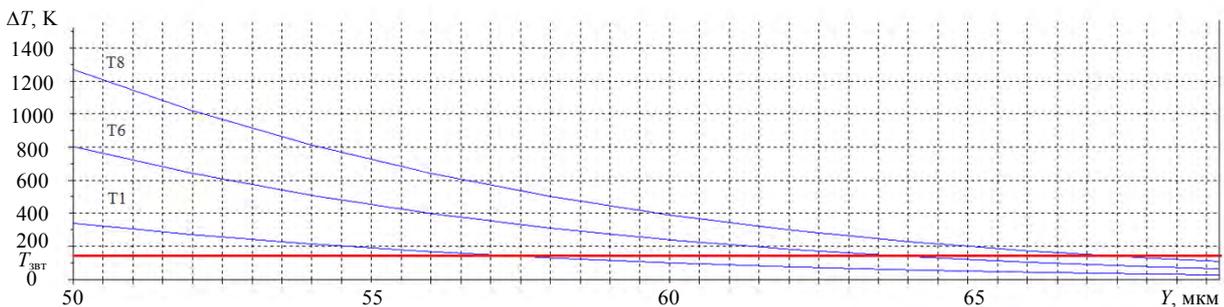


Рис. 4. Зависимость температуры на поверхности углепластика от координаты Y к моменту окончания воздействия одиночного импульса излучения

На рис. 4 изображена зависимость температуры (ΔT относительно $T_0 = 300$ К) на поверхности материала от координаты Y при $Z = 0$ и $X = 0$ к моменту окончания воздействия одиночного импульса излучения. Оценка ширины ЗТВ ($W_{ЗТВ}$) проведена по уровню температуры термодеструкции полимерной матрицы – 450 К.

На рис. 5 (см. обложку) показана аналогичная зависимость к моменту прихода следующего импульса излучения (окончания периода следования импульсов). График на рис. 5 построен для значений координаты $Y > 15$ мкм с допущением, что при $Y < 15$ мкм доминирующим является испарительный механизм обра-

зования канала реза.

Результаты теоретического расчета позволяют сделать вывод о том, что к моменту окончания действия импульса излучения наименьшее значение ЗТВ достигается в режиме работы лазера с наименьшими длительностью и энергией импульса – Т1, при этом во всех режимах работы оценка ЗТВ находится в диапазоне 50...150 мкм, что обеспечивает соответствие качества детали классу Б.

Однако режим Т1 характеризуется наименьшим значением энергии в импульсе, что снижает скорость обработки. Анализ зависимостей на рис. 5 показывает, что при работе лазера в режиме Т3 – Т7, каждый следующий импульс излучения падает на прогретую предыдущим импульсом область материала с $\Delta T \approx 150$ К при значениях коэффициента перекрытия импульсов $C \approx 1-2$, рассчитанного по формуле

$$C = \frac{d \cdot f_{имп}}{V_{скан}} \quad (6)$$

Каждый последующий импульс излучения попадает на прогретую предыдущим импульсом поверхность с $\Delta T \approx 150$ К. Это позволяет увеличить эффективность обработки за счет снижения количества энергии необходимой на нагрев материала до температуры испарения. При этом в режимах работы лазера Т7 и Т6 сохраняется достаточно высокая энергия в импульсе – 0,5 и 0,33 мДж, соответственно. Таким образом, данные режимы представляются наиболее перспективным для достижения низкого значения ЗТВ и высокой скорости обработки.

Результаты экспериментальных исследований по обработке углепластиков

В работе резка углепластика осуществлялась за счет механизма испарения материала в многопроходном режиме по алгоритму штриховки со смещением положения фокуса во время обработки (от лицевой поверхности вглубь образца, см. рис. 2) без подачи технологического газа – в атмосфере воздуха.

В процессе выполнения работы были выбраны следующие технологические параметры режима обработки: средняя мощность излучения 20 Вт; частота следования импульсов 60 кГц; длительность импульсов 50 нс (режим работы лазера Т6); диаметр сфокусированного пятна излучения 30 мкм; глубина перетяжки в фокусе 1,4 мм; скорость сканирования 1 м/с; плотность пиковой мощности 10^9 Вт/см².

Данные технологические параметры и алгоритм обработки были определены в результате экспериментальной работы, они обеспечивают ЗТВ в соответствии с классом Б, среднее значение конусности стенки канала реза не более 100 мкм и отсутствие внутренних дефектов.

Результаты обработки образцов материала из углепластиков, указанных в табл. 2, представлены на рис. 6 – 9.

На рис. 6 (см. обложку) изображена поверхность образца со стороны входа луча с указанием ширины канала реза. Из рисунка видно, что ширина канала реза составляет примерно 300 мкм, а ЗТВ соответствует классу Б.

На рис. 7 (см. обложку) изображены микрошлифы поперечного сечения канала реза. Анализ данных изображений показал отсутствие расслоения материала, термодеструкции матрицы и пор.

На рис. 8 (см. обложку) показаны типовые результаты измерений конусности канала реза. Для всех образцов среднее значение конусности не превышает 100 мкм, что соответствует качеству Н12.

На рис. 9 показаны поверхности канала реза, полученные с помощью электронного микроскопа. Анализ данных изображений показал отсутствие термодеструкции матрицы, трещин и пор.

Выводы

В процессе выполнения настоящей работы была разработана экспериментальная установка на базе импульсного наносекундного волоконного лазера мод. YLPM-1-4x200-20-20 с длиной волны 1,06 мкм и средней мощностью излучения 20 Вт.

На созданной установке отработана технология лазерной обработки терморезистивных углепластиков с разной структурой исполнения толщиной 1 мм. При рекомендуемых технологических параметрах и алгоритме лазерной обработки в режиме работы лазера Т6, обеспечивается требуемое качество деталей: ЗТВ соответствует классу Б; конусность стенки канала резания превышает 100 мкм, что позволяет выполнять сквозные отверстия в соответствии с качеством Н12; на поперечном сечении и поверхности канала реза такие дефекты как расслоение материала и термодеструкция матрицы отсутствуют.

Результаты экспериментальной работы подтвердили перспективность лазерной обработки в режиме работы лазера Т6, что соответствует теоретическим расчетам по модели мгновенно действующего нормально распре-

делённого кругового источника на поверхности полубесконечного тела. Применимость данной “теплопроводностной” модели обосновывается результатами экспериментальных измерений ЗТВ, значения которой находятся в диапазоне 50...150 мкм. Данное совпадение

экспериментальных результатов с теоретической оценкой позволяет считать преимущественно теплопроводностным механизм формирования ЗТВ при выбранных технологических параметрах лазерной размерной обработки углепластиков.

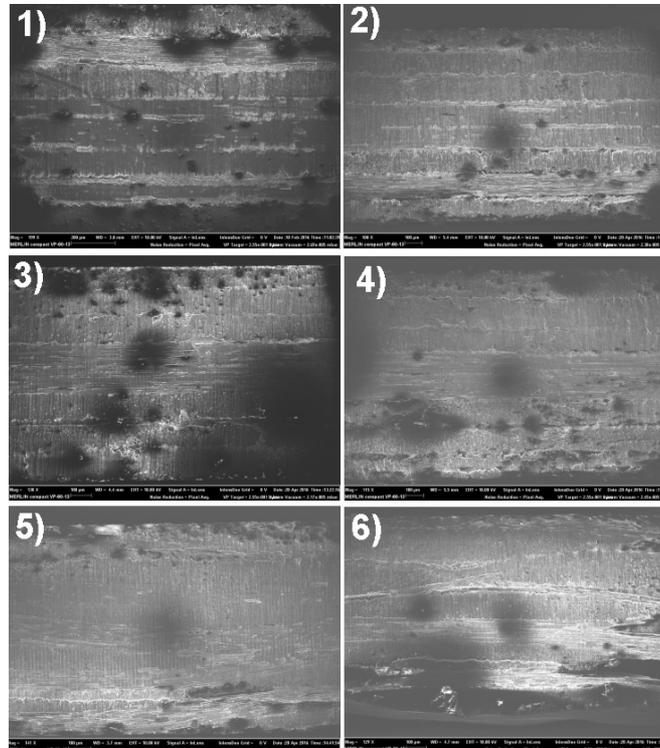


Рис. 9. Изображения поверхности канала реза. Номера образцов указаны в соответствии с табл. №2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлин, Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. – СПб.: Научные основы и технологии, 2015. – 720 с.
2. Goeke A., Emmelmann C. Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality, *Physics Procedia*, 2010, v. 5, part B, p. 253–258.
3. Weber R., Hafner M., Michalowski A., Graf T. Minimum Damage in CFRP Laser Processing, *Physics Procedia*, 2011, v. 12, part B, p. 302–307.
4. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Раздел: Технологические лазеры и лазерное излучение. Изд. 2–е испр. и допол. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 52 с.
5. Вакс, Е.Д., Миленский, М.Н., Сапрыкин, Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
6. Cenna A., Mathew P. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics – a review, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1997, Vol. 37, No. 6, p. 723–736.
7. Кархин, В.А. Тепловые процессы при сварке / В.А. Кархин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 572 с.
8. Canisius M., Herzog D, Schmidt-Lehr M., Oberlander M., Albert F., Broetje S., Ploog P., Emmelmann C. Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics, *NAFEMS Seminar*, Leipzig, 2014.
9. Гуреев, Д.М., Кузнецов, С.И., Петров, А.Л. Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 1999. №2. С. 255–264.

REFERENCES

1. Mikhailin, Yu.A. Fiber polymeric composite materials in engineering. – S-Pb.: *Scientific Fundamentals and Technologies*, 2015. – pp. 720.
2. Goeke A., Emmelmann C. Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality, *Physics Procedia*, 2010, v. 5, part B, p. 253–258.
3. Weber R., Hafner M., Michalowski A., Graf T. Minimum Damage in CFRP Laser Processing, *Physics Procedia*, 2011, v. 12, part B, p. 302–307.
4. Veiko, V.P. Basic summary of lectures on “*Physical-technical Fundamentals of Laser Technologies*”. Part: Technological lasers and laser emission. Ed. 2–d revised and supplemented. – S-Pb: S-PbSU ITMO, 2007. – pp. 52.
5. Vaks, E.D., Milenky, M.N., Saprykin, L.G. Practice of precision laser processing. M.: *Technosphere*, 2013. – pp. 696.
6. Cenna A., Mathew P. Evaluation of cut quality of fibre-reinforced plastics – a review, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1997, Vol. 37, No. 6, p. 723–736.
7. Karkhin, V.A. Thermal Processes at Welding / V.A. Karkhin. – 2-d ed. Revised and supplemented. – S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2015. – pp. 572.
8. Canisius M., Herzog D, Schmidt-Lehr M., Oberlander M., Albert F., Broetje S., Ploog P., Emmelmann C. Virtual process chain for simulation of heat affected zones during laser cutting of carbon fibre-reinforced plastics, *NAFEMS Seminar*, Leipzig, 2014.
9. Gureev, D.M., Kuznetsov, S.I., Petrov, A.L. Laser Sawing of Carbon Composite Materials // *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 1999. №2. pp. 255–264.

Рецензент д.т.н. А.Г. Григорьянц