

УДК 621.9.044, 621.373.8

## ОЦЕНКА ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

С. А. Котов<sup>1</sup>, Н. А. Лябин<sup>2</sup>, М. А. Казарян<sup>3</sup>

*При лазерной обработке углепластиков происходит формирование зоны термического влияния (ЗТВ), ухудшающей эксплуатационные свойства детали. На основе результатов расчетов температурных полей проведена оценка зависимостей ЗТВ от параметров режима обработки на современной технологической установке на базе непрерывного волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1.06 мкм и мощностью излучения 1 кВт. Показано, что для достижения требуемой для практического применения в промышленности ЗТВ  $\leq 150$  мкм рекомендуется проводить обработку в многопроходном режиме при скорости перемещения луча  $V_{\text{скан}} \geq 5$  м/с и длительностью паузы между последовательными проходами  $T_{\text{паузы}} = 0.1 \dots 0.5$  с.*

**Ключевые слова:** углепластики, волоконный иттербиевый лазер, зона термического влияния.

*Введение.* Лазерная обработка углепластиков является перспективным технологическим направлением, как альтернатива традиционным способам: механической обработке режущим инструментом и гидроабразивной резке [1]. Вместе с тем, при обработке лазерным излучением возникает ЗТВ, характеризующаяся термодеструкцией полимерной связующей матрицы, которая приводит к нарушению прочности сцепления углеродного армирующего волокнистого наполнителя (АВН) с полимерной матрицей и, следователь-

<sup>1</sup> ООО НТО «ИРЭ-Полус», 141190 Россия, Московская область, г. Фрязино, пл. Акад. Введенского, д. 1, стр. 3; e-mail: skotov@ntoire-polus.ru.

<sup>2</sup> АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина»; 141190 Россия, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а; e-mail: lilt@istokmw.ru.

<sup>3</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kazar@sci.lebedev.ru.

но, к снижению эксплуатационных свойств материала, в первую очередь, упругопрочностных [2]. Наибольшие сложности возникают при лазерной обработке углепластиков с термореактивной матрицей вследствие высокой температуры испарения углеродного волокна –  $T_{исп} \simeq 3900$  К при температуре устойчивости материала полимерной матрицы не более 450 К [3, 4], что с учетом высоких энергоемкости процесса разрушения в испарительном режиме и теплопроводности углеродного волокна требует проведения теоретических исследований, направленных на минимизацию ЗТВ.

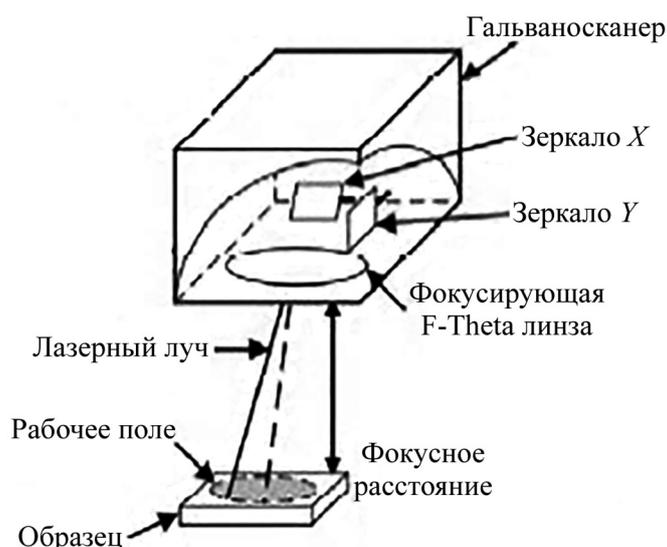


Рис. 1: Схематическое изображение метода лазерной обработки углепластиков с использованием гальваносканера с фокусирующей F-Theta линзой.

*Технологическая установка.* На современном этапе развития технологии к перспективным методам обработки углепластиков относится лазерная резка и сверление с использованием непрерывных волоконных иттербиевых лазеров мощностью  $\geq 1$  кВт с уникальной совокупностью технико-эксплуатационных свойств и двухосевых гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой, обеспечивающих скорость перемещения луча 1...10 м/с. Схематическое изображение такого метода лазерной обработки представлено на рис. 1 [5].

Основные параметры исследуемой технологической установки на базе непрерывного волоконного иттербиевого лазера модели ЛК-1000-ОМ с длиной волны  $\lambda = 1.06$  мкм и мощностью излучения  $P = 1$  кВт представлены в табл. 1.

Данная технологическая установка обеспечивает плотность мощности в сфокусированном световом пятне –  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, что на порядок больше порогового значения

для обработки углепластиков в испарительном режиме, рассчитанного по известным формулам [3, 6].

Т а б л и ц а 1

*Основные параметры технологической установки*

Максимальная скорость перемещения луча, м/с	Точность позиционирования, мкм	Фокусное расстояние F-Theta линзы, мм	Диаметр сфокусированного светового пятна, мкм	Плотность мощности излучения, Вт/см <sup>2</sup>
5	±5	254	100	$2.5 \cdot 10^7$

*Оценка ЗТВ.* Для оценки ЗТВ наиболее эффективным способом представляется применение аналитических методов расчета температурных полей с учетом влияния основных факторов, определяющих условия взаимодействия лазерного излучения с материалом:

- теплофизических свойств материала;
- оптических, энергетических и временных параметров лазерного излучения;
- технологических условий процесса обработки: скорости перемещения луча, диаметра сфокусированного светового пятна, мощности излучения.

Расчет тепловых процессов по закону теплопроводности Фурье на основе метода источников (метод функций Грина) является достаточно простым и наглядным, и позволяет быстро проанализировать влияние различных факторов на результаты решения. При обработке углепластиков излучением подвижного сосредоточенного источника с постоянной мощностью излучения движущегося прямолинейно с постоянной скоростью был применен соответствующий аналитический метод расчета тепловых процессов. При таком источнике температурное поле через некоторое время стабилизируется в подвижной системе координат, связанной с источником, и окончательное распределение температуры определяется только соотношением времени, необходимого для теплонасыщения материала и времени прохождения лазерным лучом расстояния, равного радиусу сфокусированного светового пятна излучения. Увеличение скорости перемещения луча снижает термический эффект воздействия излучения на материал и способствует уменьшению ЗТВ. Быстродвижущийся тепловой источник характеризуется высокими мощностью и скоростью перемещения. Критерий определения быстродвижущегося источника рассчитывается по формуле (1) [7, 8]:

$$\frac{V_{\text{скан}} \cdot D}{2 \cdot a} > 1, \quad (1)$$

где  $D = 100$  мкм – диаметр сфокусированного светового пятна;  $V_{\text{скан}}$  – скорость перемещения луча (м/с);  $a = 4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент температуропроводности углепластика [3, 4]. Так, при скоростях перемещения луча  $V_{\text{скан}} \geq 1$  м/с источник является быстродвижущимся. В таком случае для оценки ЗТВ допустимо использовать аналитическое решение по модели быстродвижущегося нормально распределенного кругового источника на полубесконечном теле. В соответствии с данной моделью быстроперемещающийся источник теплоты пересекает тело в направлении оси  $X$  настолько быстро, что возможно считать без большой погрешности такой источник нормально-полосовым, т.е. полностью сосредоточенным на оси  $X$ . При этом теплота на оси  $X$  выделяется мгновенно (этот момент при  $X = 0$  принимается за начало отсчета времени  $t = 0$ ) и распространяется только в направлении, перпендикулярном оси движения источника (ось  $X$ ).

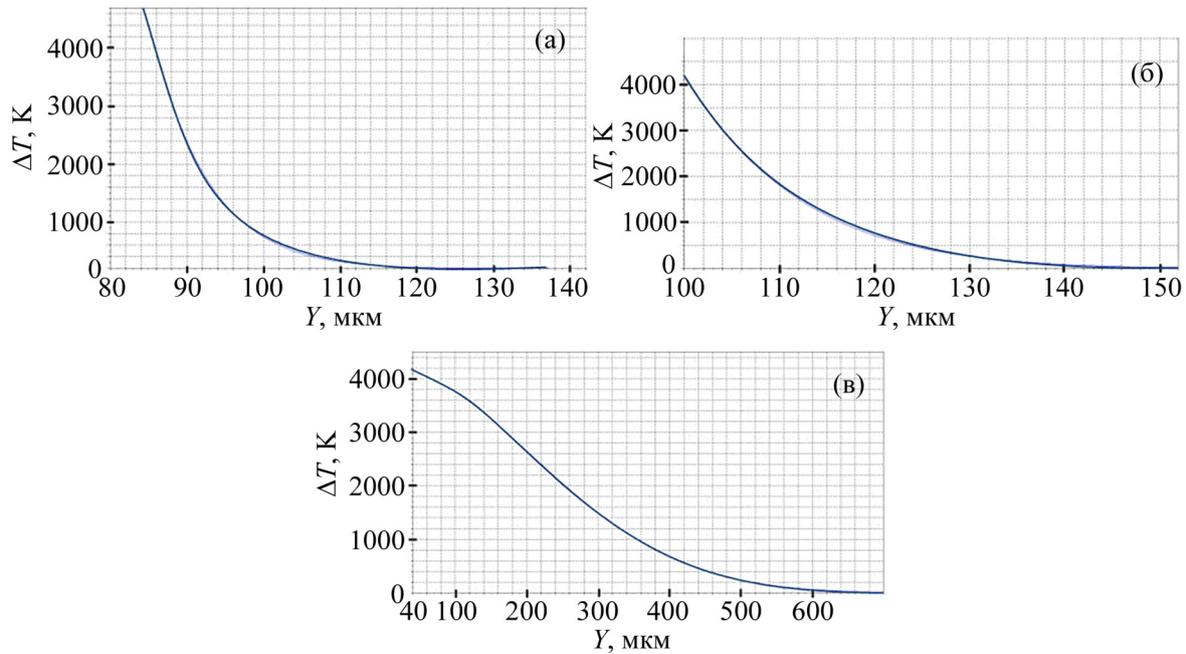


Рис. 2: Распределение температуры по оси  $Y$  для трех моментов времени: (а)  $t \ll t_0$ ; (б)  $t = t_0$ ; (в)  $t \gg t_0$  при обработке углепластика непрерывным волоконным иттербиевым лазером с  $P = 1$  кВт и  $V_{\text{скан}} = 1$  м/с.

Температурное поле в материале в плоскости  $X = 0$ , в рамках выбранной модели, имеет вид [9, 10]:

$$T(y, z, t) - T_0 = \frac{A \cdot 2 \cdot P / V_{\text{скан}}}{c \rho} \left( \frac{1}{\sqrt{4\pi a(t + t_0)}} \exp\left(-\frac{y^2}{4a(t + t_0)}\right) \right) \times$$

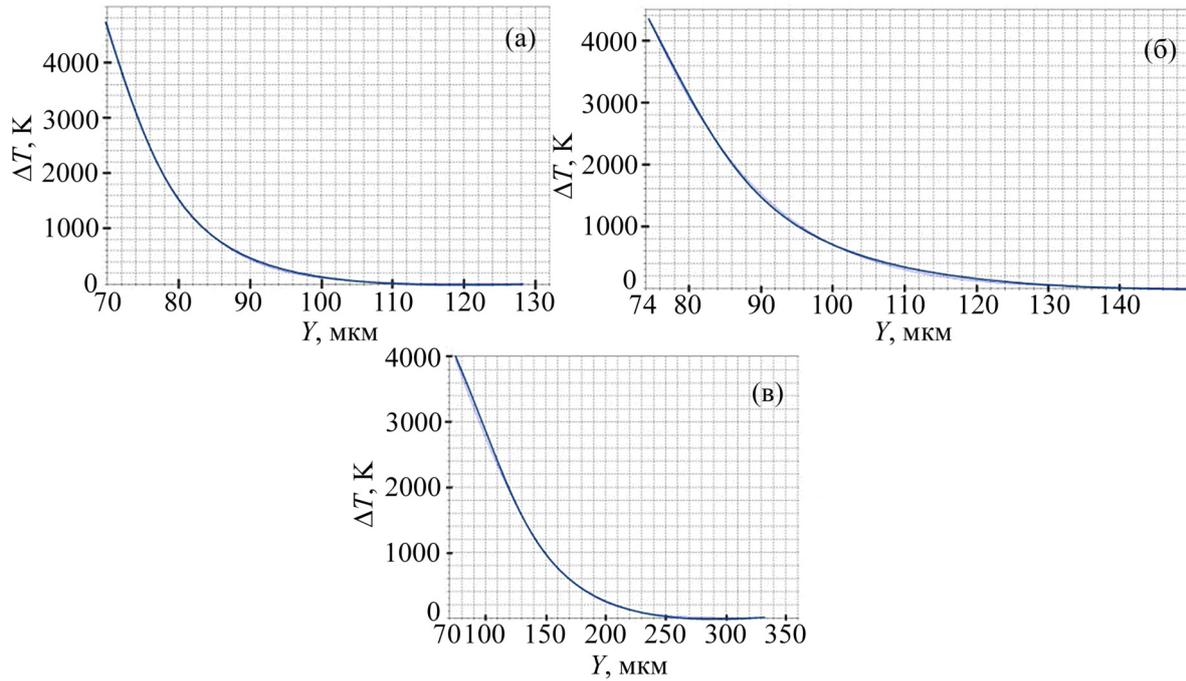


Рис. 3: Распределение температуры по оси  $Y$  для трех моментов времени: (а)  $t \ll t_0$ ; (б)  $t = t_0$ ; (в)  $t \gg t_0$  при обработке углепластика непрерывным волоконным иттербиевым лазером с  $P = 1$  кВт и  $V_{\text{скан}} = 5$  м/с.

$$\times \left( \frac{1}{\sqrt{4\pi at}} \exp \left( -\frac{z^2}{4at} \right) \right), \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды (К);  $c_p$  – теплоемкость материала (Дж/(кг·К));  $\rho$  – плотность материала (кг/м<sup>3</sup>);  $a$  – коэффициент температуропроводности (м<sup>2</sup>/с);  $A$  – коэффициент поглощения излучения;  $C = 1/(r_0)^2$  – коэффициент сосредоточенности нормально распределенного кругового источника (1/м<sup>2</sup>) – характеризует остроту кривой нормального распределения плотности мощности лазерного излучения (кривой Гаусса), где  $r_0$  – расстояние от центра сфокусированного светового пятна, на котором плотность мощности падает в  $e$  раз;  $t_0 = 1/(4aC)$  – время установления стационарного теплового поля от быстро движущегося источника (в подвижных координатах);  $V_{\text{скан}}$  – скорость движения источника по оси  $X$  (м/с);  $P$  – мощность непрерывного источника (Вт). Расчет температурного поля в материале был проведен также по теплофизическим параметрам АВН. На рис. 2 и 3 изображены расчетные зависимости температуры ( $\Delta T$  относительно  $T_0 = 293$  К) от координаты  $Y$  ( $Z = 0$ ) при скорости движения источника 1 и 5 м/с: (а) в начале процесса нагрева ( $t \ll t_0$ ); (б) в момент установления стационарного теплового поля ( $t = t_0$ ); (в) в процессе остывания ( $t \gg t_0$ ).

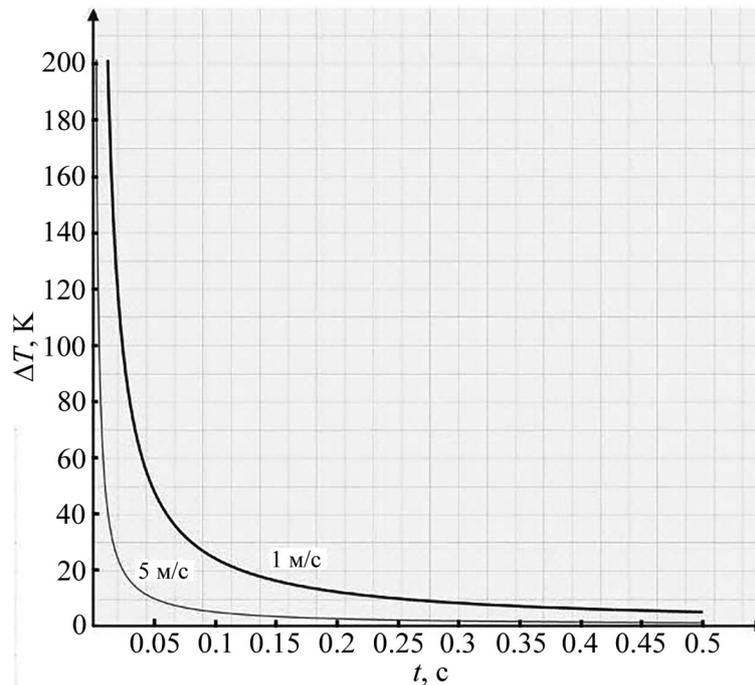


Рис. 4: Зависимости температуры поверхности углепластика на оси  $X$  за быстро движущимся источником от времени при обработке углепластика непрерывным волоконным иттербиевым лазером с  $P = 1$  кВт.

Результаты, представленные на рис. 2 и 3, показывают, что при обработке непрерывным излучением мощностью 1 кВт ширина канала реза, оцениваемая по уровню  $\Delta T \simeq 3600$  К (соответствует  $T_{\text{исп}} = 3900$  К), существенно превышает диаметр сфокусированного светового пятна и составляет порядка 200 мкм. ЗТВ, оцениваемая по уровню  $\Delta T \simeq 150$  К, с учетом обозначенной ширины канала реза уменьшается до требуемого уровня при  $V_{\text{скан}} \geq 5$  м/с. При такой скорости перемещения луча формирование сквозного канала реза в конструкционных углепластиках толщиной  $\geq 1$  мм возможно только в многопроходном режиме с послойным удалением материала. Поэтому для минимизации ЗТВ, формирующейся за счет эффекта накопления тепла в материале, необходимо выполнить оценку длительности паузы между последовательными проходами по формуле (2) при  $Y = Z = 0$ . Данное решение позволяет рассчитать максимум температуры на оси  $X$  позади быстро движущегося нормально распределенного кругового источника на полубесконечном теле по формуле (3) [9, 10]:

$$T(0, 0, t) - T_0 = \frac{A \cdot P / V_{\text{скан}}}{2\pi k \sqrt{(t + t_0)t}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)). На рис. 4 представлены расчетные зависимости температуры ( $\Delta T$  относительно  $T_0 = 293$  К) от времени  $t$  при скоростях перемещения луча 1 и 5 м/с.

Результаты, представленные на рис. 4, показывают, что при обработке непрерывным излучением материал остывает практически до начальной температуры с  $\Delta T < 10$  К через 0.25 и 0.05 с при скоростях перемещения луча 1 и 5 м/с, соответственно.

*Выводы.* Оценка ЗТВ при обработке углепластика непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт путем расчета температурных полей в материале по аналитическому решению уравнения теплопроводности для модели быстро движущегося нормально распределенного (распределение Гаусса) кругового источника показала, что ширина формируемого канала реза в 2 раза превышает диаметр сфокусированного светового пятна и составляет 200 мкм, а ЗТВ, оцениваемая по уровню температуры необратимого повреждения полимерной матрицы  $T = 450$  К, уменьшается до требуемого уровня  $\leq 150$  мкм при скоростях перемещения луча  $V_{\text{канал}} \geq 5$  м/с.

При многопроходной лазерной обработке углепластиков непрерывным излучением мощностью 1 кВт рациональным методом, уменьшающим ЗТВ, является введение паузы между последовательными проходами длительностью 0.1...0.5 с.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Е. Раскутин, А. В. Хрульков, Р. И. Гирш, Труды ВИАМ **9**, 106 (2016).
- [2] Y. S. Jamal, *Machining of Polymer Composites* (Berlin, Springer, 2009).
- [3] Д. М. Гуреев, С. И. Кузнецов, А. Л. Петров, Известия Самарского НЦ РАН **2**, 255 (1999).
- [4] А. Г. Григорьянц, В. Г. Крюков, А. Н. Савчук и др., Сварочное производство **5**, 4 (1991).
- [5] M. Zaeh, J. Moesl, J. Musiol, F. Oefele, Physics Procedia **5**, 19 (2010).
- [6] В. П. Вейко, *Технологические лазеры и лазерное излучение* (СПб, СПбГУ ИТМО, 2007).
- [7] А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов, *Лазерная обработка неметаллических материалов* (М., Высшая школа, 1988).
- [8] А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, *Технологические процессы лазерной обработки* (М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008).

- [9] Н. Н. Рыкалин, *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов* (М., Машиностроение, 1985).
- [10] В. А. Кархин, *Тепловые процессы при сварке* (СПб., Изд-во Политехн. Ун-та, 2015).

Поступила в редакцию 23 августа 2018 г.

После переработки 14 февраля 2019 г.

Принята к публикации 14 февраля 2019 г.