

Особенности лазерной резки углеродных полимерных композиционных материалов (обзор)

А. И. Носков, А. Х. Гильмутдинов, А. Р. Асадуллина

Использование технологических лазеров имеет значительное преимущество при обработке композиционных материалов (КМ) по сравнению с традиционными механическими видами обработки. Тем не менее, некоторые проблемы возникают из-за разницы в тепловых свойствах различных компонентов композита. В случае углеродных КМ волокна и матрица имеют очень разные времена испарения, поэтому, когда матрица достигает своей точки кипения (~773 К), волокна по-прежнему не подвержены воздействию (~3573 К), что приводит к возникновению зоны термического воздействия (ЗТВ). В этой статье рассматривается влияние основных параметров лазерной резки КМ, таких как время взаимодействия, мощность и длина волны лазера. Показано, что эффективность и качество лазерной обработки существенно зависят от способности материала поглощать энергию лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерная резка, композиционные материалы, зона термического воздействия, УКМ.

Ссылка: Носков А. И., Гильмутдинов А. Х., Асадуллина А. Р. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 155.

Reference: A. I. Noskov, A. Kh. Gilmutdinov, and A. R. Asadullina, Usp. Prikl. Fiz. 7 (2), 155 (2019).

Введение

В настоящее время разработана целая серия связующих и углепластиков нового поколения [1–14], которые внедряются в конструкции перспективных летательных аппаратов и автомобилей. Использование в конструкциях летательных аппаратов композиционных материалов (КМ) при разных конструктивно-технологических решениях в последние годы значительно расширяется [15]. В связи с этим остро встает вопрос о создании

метода эффективного раскроя углепластика [16–18], позволяющего быстро и качественно обрабатывать изделия с минимальными затратами на расходные материалы.

Одним из современных методов, использующих в качестве режущего инструмента сфокусированный луч света, является лазерная резка [19–22]. В сочетании с программируемыми манипуляторами, обеспечивающих высокую скорость и точность обработки, этот метод является одним из наиболее перспективных для серийного производства и раскроя изделий, в том числе и композиционных материалов [18, 22–29]. Кроме того, в процессе обработки отсутствует механический контакт между режущим инструментом и материалом, что снижает затраты на расходные материалы и дает возможность обрабатывать материал очень малой толщины [30, 31].

Тем не менее, некоторые трудности при лазерной обработке КМ все же присутствуют [22–29]. В основном они связаны с разницей в

Носков Алексей Игоревич, доцент кафедры, к.ф.-м.н.
Гильмутдинов Альберт Харисович, ректор,
академик АНРТ, д.ф.-м.н.
Асадуллина Агидель Рауфовна, магистр кафедры.
КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева.
Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.
E-mail: Micaamane@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2019 г.

© Носков А. И., Гильмутдинов А. Х.,
Асадуллина А. Р., 2019

тепловых свойствах наполнителя и армирующего волокна композита [16–31]. В данном обзоре рассматривается влияние основных параметров лазерной резки КМ, таких как время взаимодействия, мощность и длина волны лазера, на эффективность и качество процесса обработки КМ.

Механизм термической обработки, приводящий к удалению материала, сильно зависит от природы компонентов композита. Термические свойства различных полимерных смол, которые составляют 40–60 % по объему КМ, подобны друг другу. Они характеризуются низкими значениями теплопроводности и температурой деструкции. Различия в тепловых свойствах волокон и матрицы чрезвычай-

но велики как для графита (углеродного), так и для стекловолокна. Энергия, необходимая для испарения волокон, выше, чем для матрицы; следовательно, мощность лазера, необходимая для резки КМ, будет сильно зависеть от типа волокон и их объемной доли.

Можно выделить типичные повреждения КМ при лазерной обработке [28], что отражено на рис. 1.

Материаловедческие основы

Типичные термические свойства компонентов КМ приведены в табл. 1 на основе данных [28, 31–37].

Таблица 1

Типичные тепловые свойства компонентов полимерных композитов
(L – Продольный, т. е. вдоль длины волокна. T – поперечный, в радиальном направлении) [28, 31–37]

Материал	Плотность, г/см ³	Температура разложения, К	Коэффициент теплового расширения, м/мК	Теплопроводность, Вт/мК	Удельная теплоемкость Дж/(кг К)	Температуропроводность, (см ² /с)×10 ⁻³	Теплота испарения, Дж/г
Арамидное волокно	1,44	820	-2 L 59 T	0,05	1420	0,24	4000
Стеклоанное волокно	2,55	2570	5	1	850	4,61	31000
Углеродное волокно	1,85	4000	-0,5 L 5 T	50	710	380	45000
Полиэстер	1,25	670	80	0,2	1200	1,33	1000
Эпоксидная смола	1,20	700	65	0,1	1100	0,76	1100
Винил-эстер	1,25	650	75,4	0,2	1200	1,33	1000



Рис. 1. Типичные дефекты при лазерной обработке КМ [28].

Эти дефекты приводят к снижению прочностных свойств КМ. Основными параметрами лазерной обработки, влияющими на качество раскроя, являются плотность мощности, длина волны излучения, тип защитного газа, время взаимодействия, поляризация пучка,

коэффициент поглощения на данной длине волны, температура плавления и испарения, теплопроводность и теплоемкость. Полный список факторов, так или иначе влияющих на качество, представлен в виде диаграммы причинно-следственных связей на рис. 2.

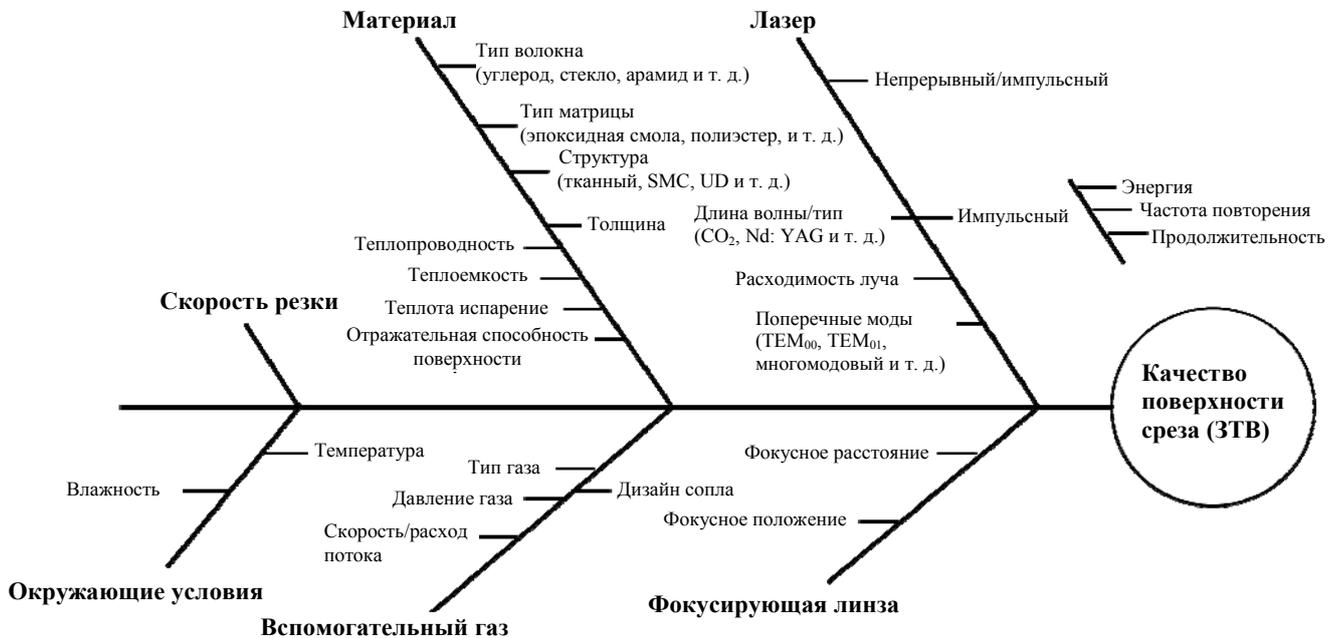


Рис. 2. Диаграмма причинно-следственной связи параметров лазерной обработки и качества поверхности КМ [35].

Плотность мощности лазера и время взаимодействия

При лазерной обработке КМ основными факторами, влияющими на степень термического повреждения, являются время взаимодействия лазерного излучения с образцом и плотность мощности лазера. Связь между временем испарения основных компонентов КМ и плотностью мощности лазерного пучка представлена на рис. 3.

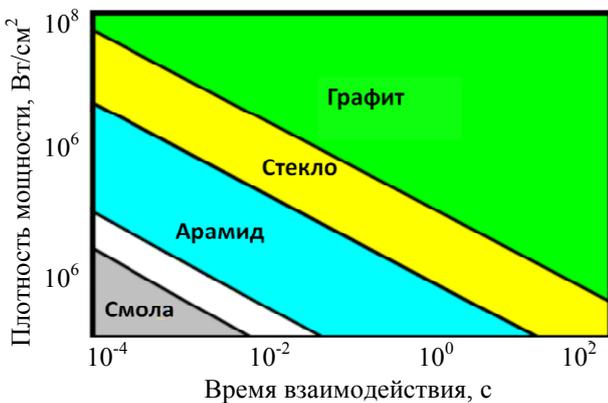


Рис. 3. Предельные условия для испарения составляющих КМ [28].

Рис. 3 показывает, что тепловое поведение армирующих компонентов и матрицы может быть схожим, но только в случае, если они имеют незначительную разницу времени испарения (например, полиэфирная смола и арамидное волокно). Поэтому КМ на основе арамидного волокна хорошо обрабатываются лазером [34]. Время, необходимое для испарения стеклянных или графитовых волокон, намного больше, чем у связующей матрицы, из-за чего матрица намного раньше достигает своей температуры испарения. В сочетании с высокой теплопроводностью углеродных волокон, это приводит к ухудшению качества резки и появлению зоны термического воздействия (ЗТВ) у композитов на основе стекло- или углеволокна [34].

Контроль плотности мощности лазера и скорости раскроя (времени взаимодействия) являются доминирующими факторами, влияющими на качество лазерной резки КМ на основе угле- или стекловолокон [34, 39]. Размеры ЗТВ, карбонизация волокон и матрицы, а также ширины и глубины реза уменьшаются с увеличением скорости раскроя и уменьше-

нием мощности лазера. Этот эффект можно описать из расчета энергии, приходящейся на единицу длины материала, в виде P_0/V_B , где P_0 – мощность лазера, а V_B – скорость резки [28]. Для достижения наилучшего качества обрабатываемого материала скорость лазерной обработки должна пропорционально увеличиваться при увеличении мощности лазера.

Данное соотношение особенно зависит от типа армирующих волокон, поскольку они имеют более высокие температуры испарения по сравнению с полимерной смолой. Например, для КМ на основе арамидных волокон это соотношение будет меньше, чем для углеволокна. В табл. 2 приведены типичные параметры лазерного раскроя различных КМ [28, 31, 39–41].

Таблица 2

Характерные параметры лазерной обработки КМ [28, 31, 39–41]

Материал	Мощность, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Глубина резки, мм
Углеродное волокно/Эпоксидная смола	1000–2000	15–120	1–4
Углеродное волокно/Эпоксидная смола	300	5	1
Углеродное волокно/Полиэстер	800	8	2
Стекловолоконное волокно/Эпоксидная смола	1000	30	5
Стекловолоконное волокно/Полиэстер	800	8	2
Кевлар/Эпоксидная смола	150–950	30	3,2–9
Арамид/Полиэстер	800	8	2

Поскольку скорость раскроя и мощность лазерного излучения связаны между собой, то существует минимальная мощность лазерного излучения, при котором достигается сквозной разрез при минимальных тепловых повреждениях. В свою очередь, максимальная скорость раскроя будет определяться толщиной материала и плотностью мощности лазера. В работе [42] авторами была предложена и экспериментально апробирована простая однопараметрическая модель определения максимальной скорости раскроя на базе следующих формул:

$$V_{B \max} = \frac{P_0}{\delta D d_B}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\pi r [L_v + C_p (T_v - T_0)]}{4\eta}, \quad (2)$$

где $V_{B \max}$ – максимальная скорость раскроя, размерность мм/с; P_0 – мощность лазера, размерность Вт; d_B – диаметр фокусного пятна, мм; D – толщина материала, мм; L_v – скрытая теплота испарения, Дж/кг; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К); T_v – температура испарения, К; T_0 – начальная температура, К; η – коэффициент поглощения пучка. Коэффициент δ с размерностью Дж/мм³ является характерной постоянной для данного материала и данного лазера. Из анализа уравнения 1 можно сделать вывод, что при раскрое КМ непрерывным лазерным излучением оптимально использовать высокую мощность в сочетании с высокой скоростью перемещения лазерного луча для уменьшения тепловых дефектов [39, 42].

Другим наиболее предпочтительным способом лазерного раскроя КМ является использование импульсных лазеров [36], что позволяет существенно уменьшить ширину ЗТВ, причем вплоть до ее полного исчезновения [43]. Импульсные лазеры сочетают в себе высокие значения интенсивности лазерного излучения за короткое время (т.е. за время импульса). Например, один миллисекундный импульс Nd:YAG лазера может генерировать излучение с плотностью мощности, превышающей 10⁹ Вт/см² [44].

Рис. 4 иллюстрирует взаимосвязь параметров лазерного импульсного излучения на примере стандартных прямоугольных импульсов.

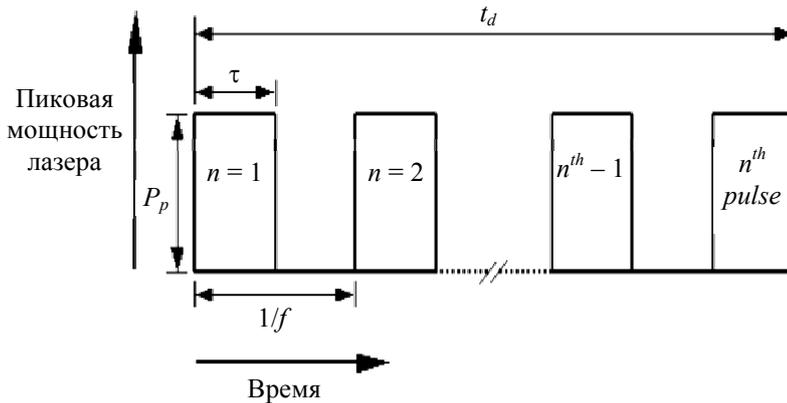


Рис. 4. Взаимосвязь параметров лазерного импульсного излучения на примере стандартных прямоугольных импульсов [44]. P_p – пиковая мощность; τ – ширина импульса; f – частота повторения; t_d – время резания; n – число импульсов; $1/f$ – период повторения импульсов.

Пиковая мощность, подаваемая в лазерном импульсе, зависит от энергии импульса E_p и длительности импульса в соответствии со следующим уравнением:

$$P_p = \frac{E_p}{\tau}. \quad (3)$$

Таким образом, интенсивность лазерного излучения в импульсе определяется следующим образом:

$$I_0 = \frac{E_p}{\tau A_0}. \quad (4)$$

Максимальная энергия импульса ограничена средней мощностью, подаваемой лазером, определяемой как:

$$P_0 = E_p \times f. \quad (5)$$

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что высокая интенсивность лазерного пучка, минимальное время взаимодействия с материалом и оптимальная фокусировка приводят к уменьшению тепловой нагрузки и, следовательно, к меньшему термическому повреждению материала. Это делает импульсные лазеры более привлекательными для раскроя углеродных КМ по сравнению с непрерывными лазерами (например, CO_2 -лазерами) [36].

В работе [36] авторы провели серию экспериментов по лазерной резке углеродных КМ с помощью импульсного Nd:YAG-лазера. Было показано, что ширина ЗТВ пропорциональна энергии импульса. Чем выше энергия импульса, тем больше ЗТВ. Однако взаимосвязь между временем взаимодействия лазера и материалом является нетривиальной. Она характеризуется несколькими параметрами: режим работы лазера (непрерывный или импульсный), частота повторения, длительность импульса и скорость резания. Высокая частота повторения, длительность импульса и медленная скорость раскроя, как правило, увеличивают время обработки материала и приводят к увеличению ЗТВ.

Влияние длины волны лазерного излучения на качество обработки КМ

Эффективность лазерной обработки также зависит от способности материала поглощать энергию лазерного излучения. Поглощательная способность материала является функцией частоты (или длины волны). Поэтому для любого обрабатываемого материала оптимальным будет являться тот тип лазера, который попадает в его область поглощения [17]. На рис. 5 представлены спектры поглощения для различных материалов.

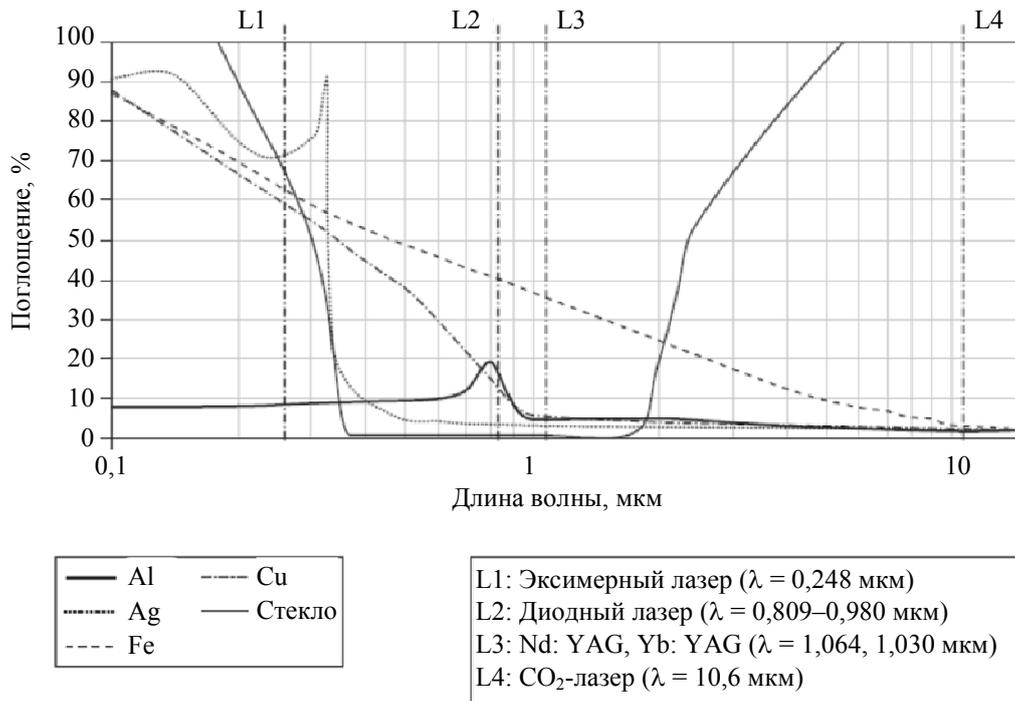


Рис. 5. Поглощательная способность как функция материала и длины волны лазера [17].

Длина волны лазерного излучения оказывает существенное влияние как на расширение ЗТВ, так и на максимальную толщину углеродного КМ (УКМ), которая может быть обработана. В работе [45] показано, что использование CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм имеет преимущества по сравнению с волоконным лазером с длиной волны 1,07 мкм (см. рис. 6). Это объясняется тем, что излучение

волоконного лазера в основном поглощается поверхностью материала, а излучение CO₂-лазеров поглощается объемом материала.

В работе [46] сравнивается качество среза жидкокристаллического КМ с использованием эксимерного и Nd:YAG-лазера. Показано, что эксимерный лазер может создавать более чистую поверхность среза с меньшим повреждением материала (рис. 7).

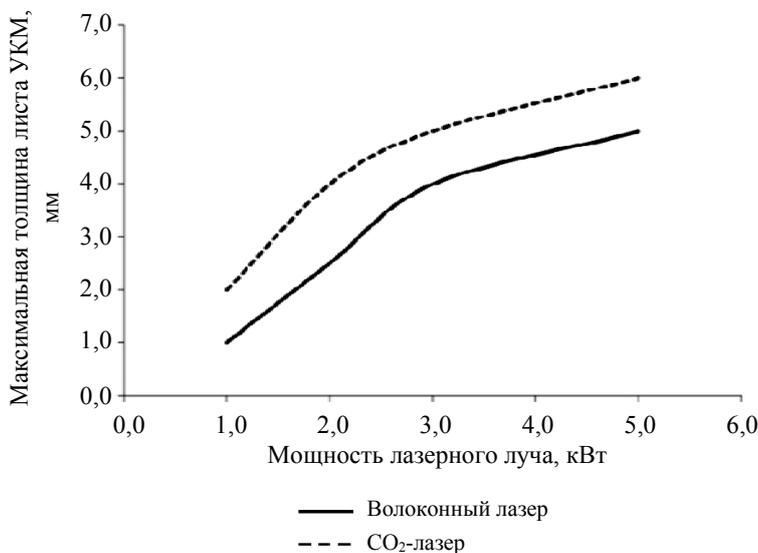


Рис. 6. Сравнение максимальной толщины УКМ, которая может быть надежно обработана с помощью волоконного или CO₂-лазера с постоянной скоростью подачи [45].

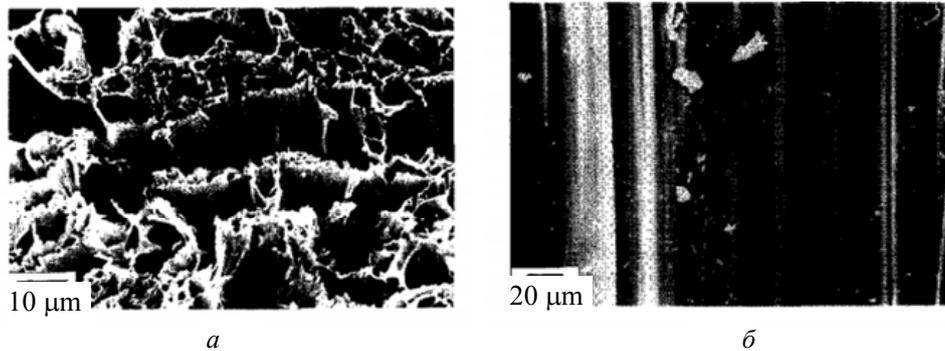


Рис. 7. Качество среза жидкокристаллического КМ: а) срез с использованием Nd:YAG; б) срез с использованием эксимерного лазера [46].

В работе [47] представлены исследования влияния лазерной резки на статическую прочность УКМ. Материал разрезается с использованием трех различных мощных лазерных источников: импульсного Nd:YAG-лазера, дискового лазера и CO₂-лазера. Для излучений Nd:YAG-лазера с длиной волны 1,064 мкм и дискового лазера с 1,03 мкм матрица УКМ является высокопрозрачной, и энергия лазера

поглощается в основном волокнами. В случае же CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм большая часть энергии поглощается матрицей. На рис. 8 показаны поперечные сечения образцов лазерной резки и выбранные параметры процесса. При сравнении образцов друг с другом видно, импульсный Nd:YAG-лазер производит наименьшую ЗТВ, в то время как CO₂-лазер дает наибольшую ЗТВ.

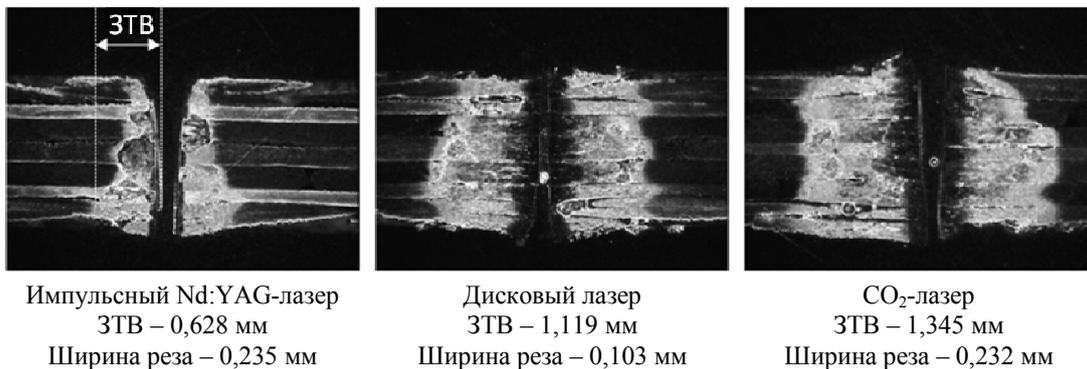


Рис. 8. Поперечные сечения образцов, обработанных с использованием различных лазерных источников [47].

Вывод

В ходе данного информационно-аналитического обзора были установлены основные факторы, влияющие на качество лазерного раскроя композиционных материалов: тип и длина волны лазерного источника, время взаимодействия излучения и материала, скорость раскроя. Из-за большой разницы в теплопроводности волокон и матрицы КМ в случае стеклопластика (~ 1800 К) и УКМ (~ 3000 К) для минимизации ЗТВ предлагается использовать импульсный тип лазеров, обеспечивающий высокую интенсивность лазерного пучка, минимальное время взаимо-

действия с материалом и высокую скорость раскроя. В случае арамидного КМ разница в теплопроводности компонентов является незначительной, что дает высокое качество лазерной обработки. Также для любого обрабатываемого материала оптимальной будет являться та длина волны лазера, которая попадает в область поглощения материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 14.Z50.31.0023 и 9.3236.2017/4.6) и Федеральной целевой программы 1.3 (№ 14.578.21.0245).

ЛИТЕРАТУРА

1. Раскутин А. Е., Хрульков А. В., Гириш Р. И. // Труды ВИАМ. 2016. № 9. С. 45.
2. Каблов Е. Н. // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. № 5. С. 43.
3. Каблов Е. Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // Российская академия наук. 2015.
4. Каблов Е. Н. // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36.
5. Каблов Е. Н. // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520.
6. Коган Д. И., Чурсова Л. В., Петрова А. П. // Клеи. Герметики. Технологии. 2011. № 6. С. 25.
7. Коган Д. И., Чурсова Л. В., Петрова А. П. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 11. С. 2–6.
8. Чурсова Л. В., Душин М. И., Хрульков А. В., Мухаметов Р. Р. В сб. тез. докл. межотраслевой науч.-технич. конф. (М.: ВИАМ. 2009). С. 17.
9. Хрульков А. В., Душин М. И., Попов Ю. О., Коган Д. И. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 292.
10. Тимошков П. Н., Коган Д. И. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. № 4. Ст. 07.
11. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Ким М. А., Бабин А. Н. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 260.
12. Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Чурсова Л. В., Коган Д. И. // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 38.
13. Бабин А. Н. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. № 4. Ст. 11.
14. Граценков Д. В., Чурсова Л. В. // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 231.
15. Hexcel Corporation Annual Report 2004.
16. Fürst A., Hipp D., Klotzbach A., Hauptmann J., Wetzig A., Beyer E. // Advanced Engineering Materials. 2016. Vol. 18. No. 3. P. 403.
17. Hocheng H. (ed.). Machining technology for composite materials: principles and practice. – Elsevier, 2011.
18. Walter J., Hustedta M., Staehra R., Kaierlea S., Jaeschke P., Suttman O., Overmeyera L. // Physics Procedia. 2014. Vol. 56. P. 1153.
19. Schaaf P. (ed.). Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments. – Springer Science & Business Media. 2010. Vol. 139.
20. Ion J. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. – Elsevier, 2005.
21. Stepanov A., Saukkonen E., Piili H. // Physics Procedia. 2015. Vol. 78. P. 138.
22. Lawrence J. R. (ed.). Advances in laser materials processing: technology, research and applications. – Woodhead Publishing, 2017.
23. Campbell Jr F. C. (ed.). Manufacturing processes for advanced composites. – Elsevier, 2003.
24. Baker A., Mallick P. K. Composites engineering handbook // Joining and repair of aircraft composite structures. New York: Marcel Dekker. 1997.
25. Tagliaferri V., Di Ilio A., Visconti C. // Composites. 1985. Vol. 16. No. 4. P. 317.
26. Dell'Erba M., Galantucci L. M., Miglietta S. // Composites Manufacturing. 1992. Vol. 3. No. 1. P. 14.
27. Aoyama E., Inoue H., Hirogaki T., Nobe H., Kitahara Y., Katayama T. // Composite structures. 1995. Vol. 32. No. 1-4. P. 567.
28. Cenna A. A., Mathew P. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Vol. 37. No. 6. P. 723.
29. Mello M. D. // Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering. – International Society for Optics and Photonics. 1986. Vol. 668. P. 288.
30. Abrate S., Walton D. // Composites Manufacturing. 1992. Vol. 3. No. 2. P. 85.
31. Negarestani R. Laser cutting of carbon fiber reinforced polymer composite material. PhD Thesis, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester, UK. 2010. P. 239.
32. Negarestani R., Li L. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013. Vol. 227. No. 12. P. 1755.
33. Pan C. T., Hocheng H. // Journal of materials processing technology. 1996. Vol. 62. No. 1-3. P. 54.
34. Hejjaji A., Singh D., Kubher S., Kalyanasundaram D., Gururaja S. Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling. Compos Part A-Appl S. 2016. No. 82. P. 42.
35. Mathew J., Goswami G. L., Ramakrishnan N., Naik N. K. // Journal of Materials Processing Technology. 1999. Vol. 89. P. 198.
36. Fenoughty K. A., Jawaid A., Pashby I. R. // Journal of materials processing technology. 1994. Vol. 42. No. 4. P. 391.
37. Voisey K. T., Fouquet S., Roy D., Clyne T. W. // Optics and lasers in engineering. 2006. Vol. 44. No. 11. P. 1185.
38. Steen W. M. Laser material processing. – London: Springer-Verlag, 2005.
39. Tagliaferri V., Di Ilio A., Crivelli Visconti V. // Conference on Composite Materials ICCM, and Second European Conference on Composite Materials. – 1987.
40. Negarestani R., Li L. // Machining Technology for Composite Materials. 2012. P. 288.
41. Koenig W., Wulf Ch., Graß P., Willerscheid H. // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 1985. Vol. 34. No. 2. P. 537.
42. Caprino G., Tagliaferri V. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1988. Vol. 28. No. 4. P. 389.
43. Gureev D. M., Kuznetsov S. I., Petrov A. L. // Journal of Russian Laser Research. 1999. Vol. 20. No. 4. P. 349.
44. Ready J. F. Industrial applications of lasers. – New York: Academic Press, 1998.
45. Goeke A., Emmelmann C. // Physics Procedia. 2010. Vol. 5. P. 253.
46. Lau W. S., Yue T. M., Lee T. C., Leematerials W. B. // Journal of Materials Processing Technology. 1995. Vol. 48. No. 1-4. P. 199.
47. Herzog D., Jaeschke P., Meier O., Haferkamp H. // International journal of machine tools and manufacture. 2008. Vol. 48. No. 12-13. P. 1464.

Features of laser cutting of carbon polymer composite of materials (a review)

A. I. Noskov, A. Kh. Gilmudinov, and A. R. Asadullina

A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University
10 Karl Marx st., Kazan, Republic of Tatarstan, 42011, Russia
E-mail: Micaamane@mail.ru

Received January 24, 2019

The use of technological lasers has a significant advantage in the processing of composite materials (CM), compared with traditional mechanical processing. However, some problems arise due to the difference in thermal properties of the various components of the composite. In the case of CFRP, the fiber and the matrix have very different evaporation times, so when the matrix reaches its boiling point (~773 K), the fibers are still unaffected (~3573 K), which leads to the formation of a heat-affected zone (HAZ). This article is devoted to the literary analysis of the influence of the main parameters of CM laser cutting technology, such as interaction time, power and laser wavelength. It is shown that the efficiency and quality of laser processing substantially depends on the ability of a material to absorb laser energy.

Keywords: laser cutting, composite, heat affected zone, CFRP.

REFERENCES

1. A. E. Raskutin, A. V. Khrulkov, and R. I. Girsh, *Trudy VIAM*, No. 9, 45 (2016).
2. E. N. Kablov, *Permskie aviacionnye dvigateli: inform. bull.*, No. S, 43 (2014).
3. E. N. Kablov, *Futuire of VIAM: interview* (2015).
4. E. N. Kablov, *Metally Evrazii*, No. 1, 36 (2015).
5. E. N. Kablov, *Vestnik Rossijskoy akademii nauk* **82** (6), 520 (2012).
6. D. I. Kogan, L. V. Chursova, and A. P. Petrova, *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, No. 6, 25 (2011).
7. D. I. Kogan, L. V. Chursova, and A. P. Petrova, *Vse Materialy. Enciklopedicheskij spravochik*, No. 11, 2 (2011).
8. L. V. Chursova, M. I. Dushin, A. V. Chrulkov, and R. R. Mu-khametov, in *Proc. Interbranch Conf.* (Moscow, VIAM, 2009), p. 17.
9. A. V. Khrulkov, M. I. Dushin, U. O. Popov, and D. I. Kogan, *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, No. S, 292 (2012).
10. P. N. Timoshkov and D. I. Kogan, *Trudy VIAM*, No. 4, 07 (2013).
11. R. R. Mukhametov, K. R. Akhmadieva, M. A. Kim, and A. N. Babin, *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, No. S, 260 (2012).
12. R. R. Mukhametov, K. R. Akhmadieva, L. V. Chursova, and D. I. Kogan, *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, No. 2, 38 (2011).
13. A. N. Babin, *Trudy VIAM: electron. Journ.*, No. 4, 11 (2013).
14. D. V. Grashenkov and L. V. Chursova, *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, No. S, 231 (2012).
15. *Hexcel Corporation Annual Report*, (2004).
16. A. Fürst, D. Hipp, A. Klotzbach, J. Hauptmann, A. Wetzig, and E. Beyer, *Advanced Engineering Materials* **18** (3), 403 (2016).
17. H. Hocheng (ed.), *Machining technology for composite materials: principles and practice* (Elsevier, 2011).
18. J. Walter, M. Hustedta, R. Staehra, S. Kaierlea, P. Jaesckea, O. Suttmana, and L. Overmeyera, *Physics Procedia* **56**, 1153 (2014).
19. P. Schaaf (ed.), *Springer Science & Business Media*, **139** (2010).
20. J. Ion, *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application* (Elsevier, 2005).
21. A. Stepanov, E. Saukkonen, and H. Piili, *Physics Procedia*, **78**, 138 (2015).
22. J. R. Lawrence (ed.), *Advances in laser materials processing: technology, research and applications* (Woodhead Publishing, 2017).
23. Jr F. C. Campbell (ed.), *Manufacturing processes for advanced composites*, (Elsevier, 2003).
24. A. Baker and P. K. Mallick, *Joining and repair of aircraft composite structures*, (NewYork: Marcel Dekker, 1997).
25. V. Tagliaferri, A. Di Ilio, and C. Visconti, *Composites* **16** (4), 317 (1985).
26. M. Dell'Erba, L. M. Galantucci, and S. Miglietta, *Composites Manufacturing* **3** (1), 14 (1992).
27. E. Aoyama, H. Inoue, T. Hirogaki, H. Nobe, Y. Kitahara, and T. Katayama, *Composite structures* **32** (1-4), 567 (1995).

28. A. A. Cenna and P. Mathew, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **37** (6), 723 (1997).
29. M. D. Mello, *Laser Processing: Fundamentals, Applications, and Systems Engineering*. – International Society for Optics and Photonics **668**, 288 (1986).
30. S. Abrate and D. Walton, *Composites Manufacturing* **3** (2), 85 (1992).
31. R. Negarestani, *Laser cutting of carbon fiber reinforced polymer composite material. PhD Thesis*, (School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester, UK. 2010)
32. R. Negarestani and L. Li, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* **227** (12), 1755 (2013).
33. C. T. Pan and H. Hocheng, *Journal of materials processing technology* **62** (1-3), 54 (1996).
34. A. Hejjaji, D. Singh, S. Kubher, D. Kalyanasundaram, and S. Gururaja, *Appl S.*, No. 82, 42 (2016).
35. J. Mathew, G. L. Goswami, N. Ramakrishnan, and N. K. Naik, *Journal of Materials Processing Technology* **89**, 198 (1999).
36. K. A. Fenoughty, A. Jawaid, and I. R. Pashby, *Journal of materials processing technology* **42** (4), 391 (1994).
37. K. T. Voisey, S. Fouquet, D. Roy, and T. W. Clyne, *Optics and lasers in engineering* **44** (11), 1185 (2006).
38. W. M. Steen (ed.), *Laser material processing*, (London, Springer-Verlag 2005).
39. V. Tagliaferri, A. Di Ilio, and V. Crivelli Visconti, in *Conference on Composite Materials ICCM, and Second European Conference on Composite Materials* (1987).
40. R. Negarestani and L. Li, *Machining Technology for Composite Materials*, 288 (2012).
41. W. Koenig, Ch. Wulf, P. Graß, and H. Willerscheid, *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **34** (2), 537 (1985).
42. G. Caprino and V. Tagliaferri, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **28** (4), 389 (1988).
43. D. M. Gureev, S. I. Kuznetsov, and A. L. Petrov, *Journal of Russian Laser Research* **20** (4), 349 (1999).
44. J. F. Ready (ed.), *Industrial applications of lasers* (New York: Academic Press, 1998).
45. A. Goeke and C. Emmelmann, *Physics Procedia* **5**, 253 (2010).
46. W. S. Lau, T. M. Yue, T. C. Lee, and W. B. Lee-matials, *Journal of Materials Processing Technology* **48** (1-4), 199 (1995).
47. D. Herzog, P. Jaeschke, O. Meier, and H. Haferkamp, *International journal of machine tools and manufacture* **48** (12-13), 1464 (2008).