

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА АРМИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ ПЛАСТИКА С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Т.Б. Урушадзе

tamara.urushadze@mail.ru

SPIN-код: 1566-6702

Е.Ю. Брыжеватых

79164112206@yandex.ru

SPIN-код: 9979-6451

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено применение лазерной обработки для разрезания пластика, армированного углеродным волокном. Показано, что уменьшение теплового воздействия при лазерной резке CFRP является одной из главных задач. В этой связи изучено влияние режимов лазерной резки на зону термического влияния. В установке использовали волоконный лазер Yt — YAG высокой мощности, оснащенный специальной оптической системой. Для определения оптимальных параметров процесса обработки использовали такие данные, как число проходов разрезания, необходимая энергия, приходящаяся на единицу длины, и достижимое качество разрезания. Также исследовали многопроходный процесс и зависимость расширения зоны термического влияния от числа проходов. Представлены параметры режимов обработки. Даны рекомендации по организации и проведению процесса.

Ключевые слова

Углепластик, лазерная резка, зона термического влияния, оптоволоконный лазер, однопроходный режим лазерной обработки, многопроходный режим лазерной обработки, эффективная скорость подачи, мощность лазера

Поступила в редакцию 30.11.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Обычная механическая обработка армированного углеродным волокном пластика (carbon fibre reinforced plastics, CFRP) приводит к быстрому износу и сокращению срока службы инструмента и, как следствие, к большим финансовым издержкам. Лазерная обработка является перспективной альтернативой, поскольку при таком виде обработки не изнашивается режущий инструмент [1]. Однако термическое влияние лазерной обработки является серьезной проблемой. Поэтому уменьшение теплового повреждения при лазерной резке CFRP — одна из главных задач [2].

Один из способов уменьшения теплового ущерба — использование коротких и ультракоротких импульсных лазерных систем [3]. CFRP можно разрезать пикосекундным и фемтосекундным лазерами, успешно ограничивающими зону термического влияния (ЗТВ) в диапазоне от 10 до 100 мкм. ЗТВ для непрерывных (CW) лазерных систем составляет приблизительно 100 мкм [4]. Данный вид обработки осуществляется при эффективной скорости обработки $V_{eff} > 1$ м/мин сравнительно низкой средней мощности ультракороткими импульсными лазерными системами, которые часто недостаточно эффективны с точки зрения производительности. По-

этому другим способом уменьшения теплового ущерба является резка CFRP с высокой интенсивностью и высокой скоростью обработки [5].

Экспериментальная установка. Эксперимент проводили с учетом следующих особенностей:

1) спецификации материала. Материал CFRP, выбранный для процесса, применяют в автомобильной отрасли. 2D-образцы изготовлены с использованием вакуумной технологии и состоят из шести слоев нагофрированных углеродных тканей, а также эпоксидной смолы;

2) характеристик лазерной и оптической систем. В установке использовали волоконный лазер Yt: YAG высокой мощности со специальной оптической системой, которая может воспроизводить необходимые для экспериментов интенсивности. Лазерный луч направляли на отметку 300 мкм производственного элемента, а затем он коллимировался и фокусировался оптической системой до достижения фокального диаметра $d = 250$ мкм;

3) относительного перемещения образцов. Обычно при обработке лазерных материалов относительное перемещение реализуется либо с помощью движения заготовки, либо путем перемещения луча по линейной оси, а также с использованием сканаторных систем [6].

Сканаторные системы способны работать уже с достаточно высокими скоростями подачи, до нескольких м/с. Однако даже использование таких систем не позволяет достичь мощности лазера $P_L = 30,5$ кВт и одновременно чрезвычайно высоких скоростей подачи [7]. Поэтому в разработанной установке реализуется перемещение заготовок, в то время как лазерная оптика остается неподвижной. Чтобы определить влияние числа проходов при резке, достижимая скорость подачи должна быть достаточно высокой для того, чтобы процесс при $n \geq 30$ проходил при максимально возможной интенсивности лазерного излучения. Это обстоятельство обуславливает требование относительно системы перемещения: максимальная скорость $V = 80$ м/с для $n = 30$.

Оптическую систему прикрепляли к неподвижной стойке, что позволило получить точное позиционирование в направлении распространения луча с точностью $\Delta_z < 100$ мкм (рис. 1).

Результаты исследования. Для определения оптимальных параметров осуществляли однопроходный процесс при мощности лазера 30 кВт. Впоследствии был исследован многопроходный процесс и влияние числа проходов на расширение ЗТВ.

Однопроходный процесс. Первые эксперименты проводили с использованием фиксированной мощности лазера $P_L = 30,5$ кВт и изменяющейся скоростью подачи для того, чтобы определить максимальную скорость резки за один проход лазера. Максимальная достигаемая скорость подачи $V_{(n=1)} = 1$ м/с. Энергию, приходящуюся на единицу длины, определим по формуле [8]

$$E_s = \frac{P_L}{V}, \quad (1)$$

что составляет 25,4 кДж/м для однопроходного процесса.

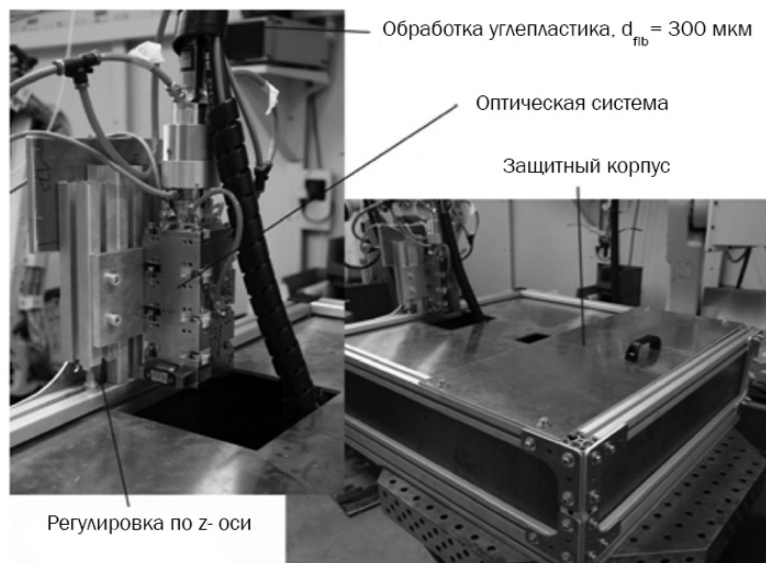


Рис. 1. Высокоскоростная экспериментальная установка лазерной резки

На рисунке 2 показано поперечное сечение полученного разреза при лазерной резке за один проход при работе лазера на полной мощности и максимально достижимой скорости резания.

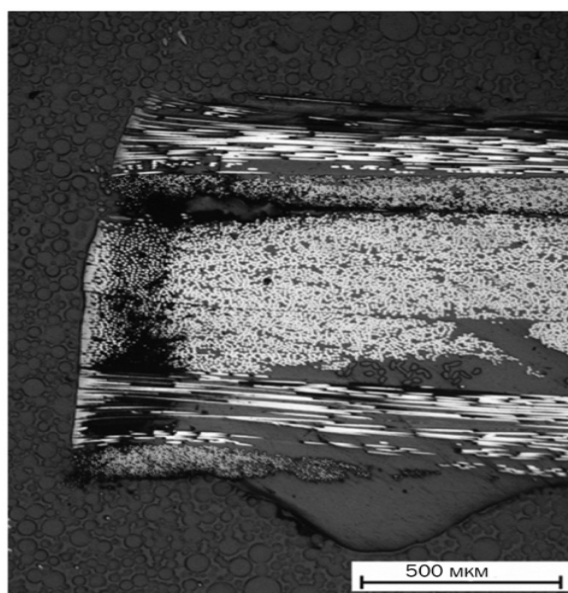


Рис. 2. Поперечное сечение образца при $P_L = 30,5$ кВт; $V = 1,2$ м/с; $n = 1$

Боковое расширение зоны, подверженной воздействию тепла, измеряли от поперечного сечения до толщины слоя. Были исследованы правые и левые стороны каждого из трех образцов и получены шесть значений ЗТВ. Среднее значение этого параметра для $n = 1$ составило 139 мкм.

Многопроходный процесс. С целью дальнейшего сокращения времени взаимодействия лазерного луча и материала исследован многопроходный процесс. В ходе проведения эксперимента мощность лазера была постоянной, равной 30,5 кВт. Цель работы — определение фактического потребления энергии, необходимой для достижения полного разрезания при заданном числе проходов n . В соответствии со значением скорости подачи при однопроходном процессе ожидаемую скорость подачи при многопроходном процессе можно рассчитать и использовать как начальное значение. Например, для $n = 2$ устанавливали скорость подачи $V_n = 2,4$ м/с. Если образец был полностью разрезан в этих условиях, скорость подачи увеличивали на 0,1 м/с, в противном случае — уменьшали на 0,1 м/с. Эксперимент повторяли до тех пор, пока максимальная скорость подачи для заданного числа проходов не была определена. Пренебрегая потерями энергии, количество энергии испарения материала считали неизменным, независимо от числа проходов [6]. Таким образом, суммарная энергия

$$E_{s,c} = \sum_{i=1}^n E_{s,i}, \quad (2)$$

где $E_{s,i}$ — энергия, приходящаяся на единицу длины при каждом проходе.

На рисунке 3 представлена минимальная суммарная энергия, приходящаяся на единицу длины, необходимая для разрезания материала при определенном числе проходов n . Таким образом, можно сделать вывод, что необходимое количество энергии для многопроходного процесса уменьшается при увеличении числа проходов n . Достигнув минимума, энергия резко увеличивается при $n > 20$. При этом эффективная скорость подачи задана произведением скорости подачи прохода V_n и числа проходов n .

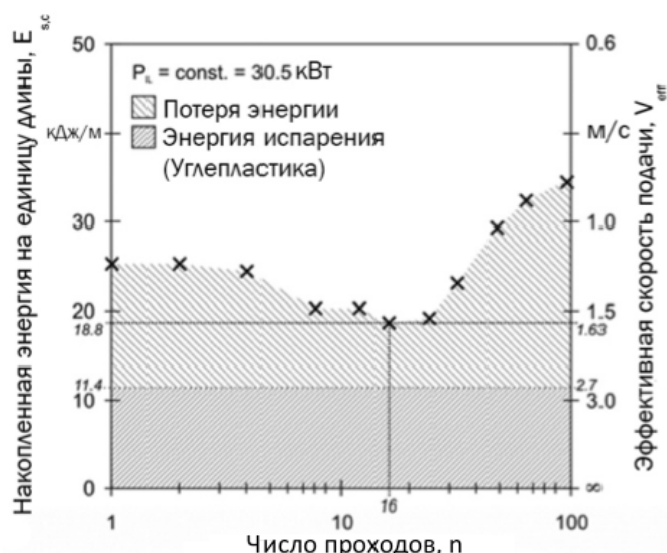


Рис. 3. Зависимости накопленной энергии и эффективной скорости подачи от числа проходов

Для полного разрезания материала необходимо меньшее количество энергии и более высокая скорость процесса. Оптимальные значения достигнуты для $n = 16$, $E_{s,c} = 18,8$ кДж/м и $V_{eff} = 1,63$ м/с. ЗТВ определена на основании анализа сечений разреза образцов в зависимости от числа проходов n (рис. 4).

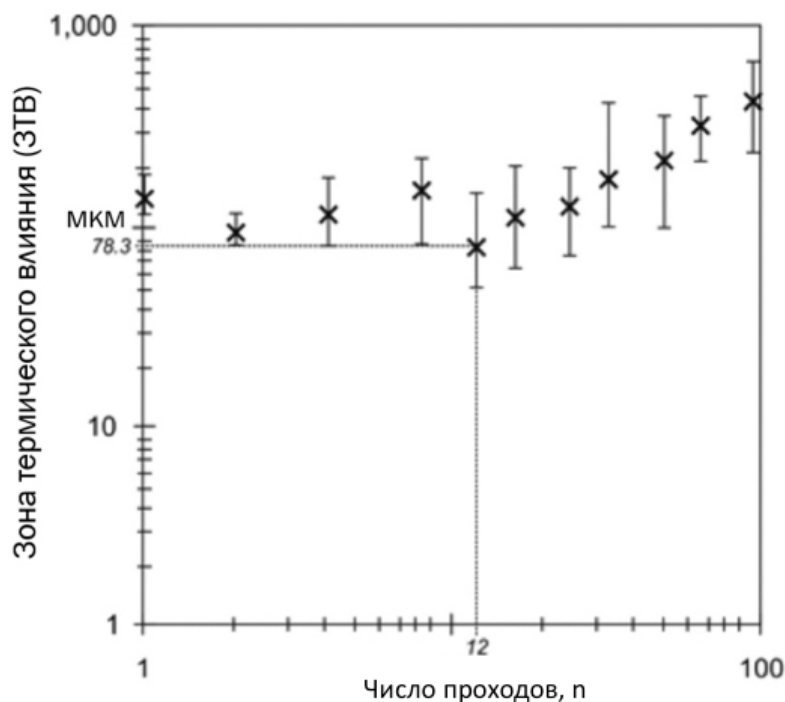
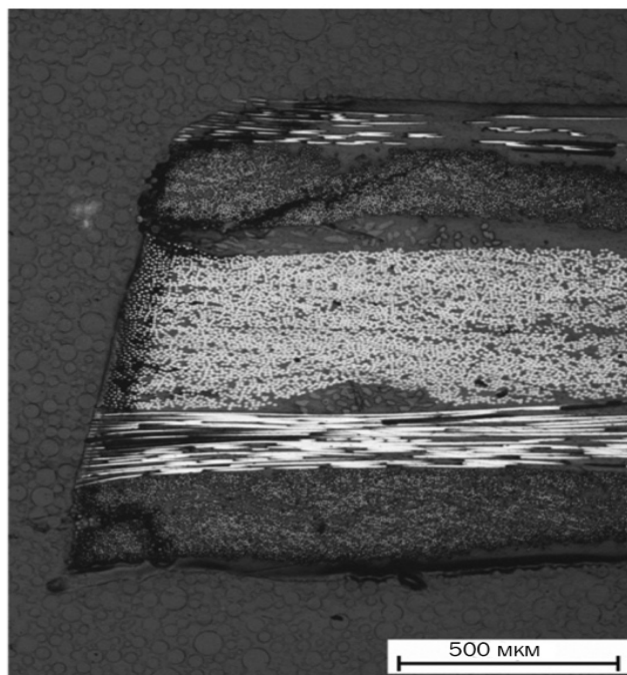


Рис. 4. Зависимость размера ЗТВ от числа проходов

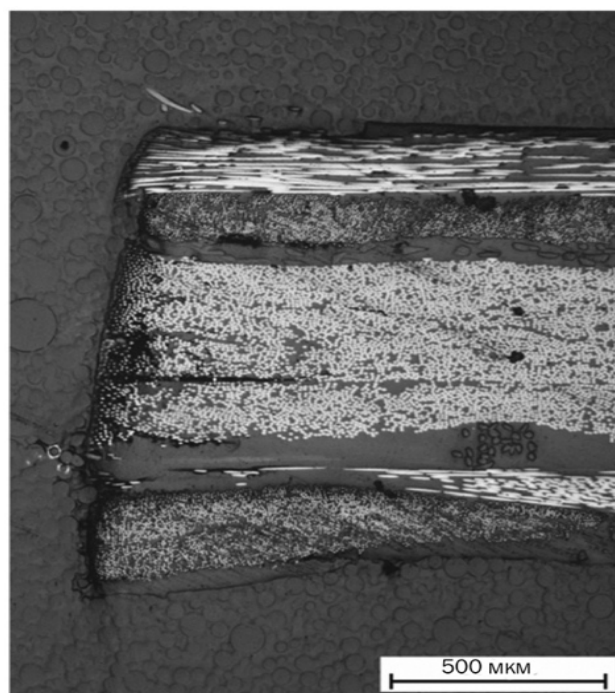
Из рисунка 4 видно, что ЗТВ медленно уменьшается по мере увеличения числа проходов до 12, минимум находится на n меньше, чем минимум суммарной энергии на единицу длины. С увеличением числа n происходит увеличение размера ЗТВ. Существует наилучшее соотношение между общим объемом энергии (см. рис. 3) и ЗТВ (см. рис. 4), тогда как минимум кривой более выражен в случае суммарной энергии, приходящейся на единицу длины.

На рисунке 5, а показано поперечное сечение образца при $n = 12$ в минимуме кривой ЗТВ. В центральной части образца толщиной 1,4 мм ЗТВ находится в диапазоне от 0 до 50 мкм. Однако в случае однопроходного процесса у вершины и задней поверхности могут образовываться трещины и сколы (см. рис. 2). Часто это является следствием высокого давления процесса, которое возникает в результате частичного испарения матрицы внутри материала.

На рисунке 5, б показано поперечное сечение образца при $n = 16$ и минимальном потреблении энергии. В целом результат схож с предыдущим, однако имеются незначительные изменения ЗТВ вследствие несовершенства слоев. Таким образом, процесс резания оптимально может быть выполнен при $n = 16$, достигнув наивысшей эффективной скорости подачи.



a



б

Рис. 5. Поперечное сечение образца при $P_L = 30,5$ Вт; $V = 18$ м/с; $n = 12$ (*a*)
и $P_L = 30,5$ Вт; $V = 26$ м/с; $n = 16$ (*б*)

Выводы. Показано, что использование лазера мощностью 30,5 кВт позволяет разрезать CFRP толщиной 1,4 мм при однократном процессе со скоростью $V = 1,2$ м/с и ЗТВ = 139 мкм. При многократном процессе ЗТВ уменьшается до 78 мкм при $n = 12$, а необходимая энергия — на 26 % (до $E_{s,c} = 18,8$ кДж/м). Эффективную скорость подачи можно увеличить до $V_{eff} = 1,63$ м/с, используя сверхмощную лазерную систему, что представляется привлекательным для промышленного применения с высокими объемами производства и невысокими требованиями качества, поскольку на поверхности образцов возможно образование трещин, вероятно, в результате высокого давления в ходе протекания процесса. Предполагается, что такое поведение является следствием недостаточного поглощения длины волны лазера на матрице материала, приводящее к быстрому осаждению энергии в материале и частичному испарению под поверхностью [10]. Для доказательства или опровержения этого предположения необходимы дальнейшие исследования, например эксперименты лазерной резки слоев с поглощающими частицами. Моделирование данного процесса может быть использовано для определения оптимальных характеристик поглощения материала.

Литература

- [1] Emmelmann C., Petersen M., Goeke A., Canisius M. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength. *Physics Procedia*, 2011, no. 12, pp. 565–571.
- [2] Niino H., Kawaguchi Y., Sato T., Narazaki A., Kurosaki R., Muramatsu M., Harada Y., Nagashima T., Wakabayashi K., Nagashima T., Kase Z., Matsushita M., Furukawa K., Nishino M. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). *Proc. of Int. Symp. on Laser Processing of CFRP and Composites*, 2012, no. 4, pp. 119–126.
- [3] Wolynski A., Herrmann T., Muchab P., Halouic H., L'huilliera J. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 292–301.
- [4] Herzog D., Jaeschke P., Meier O., Haferkamp H. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, no. 48, no. 12-13, pp. 1464–1473.
- [5] Bluemel S., Jaeschke P., Wippo V., Bastick S., Stute U., Kracht, D., Haferkamp H. Laser machining of CFRP using a high power laser — Investigation on the heat affected zone. *Physics Procedia*, 2014, no. 56, pp. 1–8.
- [6] Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote laser cutting of CFRP: improvements in the cut surface. *Physics Procedia*, 2012, no. 39, pp. 161–170.
- [7] Haferkamp H., Alvensleben F., Seebaum D., Goede M., Puester T. Air contaminants generated during laser processing of organic materials and protective measures. *Journal of Laser Applications*, 1998, vol. 10, no. 3, pp. 109–113.
- [8] Fujita M., Somekawa T., Miyanaga N. Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 636–639.
- [9] Graf T., Weber R. Laser applications from production to machining of composite materials. *Proceedings of EALA*, 2012, pp. 289–299.
- [10] Goeke A., Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 253–258.

Урушадзе Тамара Бежановна — студентка кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Брыжеватых Елизавета Юрьевна — студентка кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Богданов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

LASER MACHINING OF THE PLASTIC REINFORCED WITH CARBON FIBER BY MEANS OF FIBER LASER

T.B. Urushadze

tamara.urushadze@mail.ru

SPIN-code: 1566-6702

E.Yu. Bryzhevatykh

79164112206@yandex.ru

SPIN-code: 9979-6451

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the application of laser machining for cutting the plastic reinforced with carbon fiber. The study shows that the decrease of heating effect during CFRP laser cutting is one of the high-priority tasks. In this regard, we investigate the impact of laser cutting modes on the heat-affected zone. In the laser machine we have used a high-powered fiber laser Yt — YAG, equipped with the special optical system. In order to define the optimal parameters of the machining process we have used such data as the cut count, the energy required for the unit of length and the achieved quality of cutting. The article also examines the multiple-pass process and the heat-affected zone expanding dependency on the cut count. We provide the parameters of the machining modes and give some recommendations concerning the process organization and running.

Keywords

Carbon fiber, laser cutting, heat-affected zone, fiber laser, one-pass operation of laser machining, multiple-pass operation of laser machining, effective feed velocity, laser power

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Emmelmann C., Petersen M., Goeke A., Canisius M. Analysis of laser ablation of CFRP by ultra-short laser pulses with short wavelength. *Physics Procedia*, 2011, no. 12, pp. 565–571.
- [2] Niino H., Kawaguchi Y., Sato T., Narazaki A., Kurosaki R., Muramatsu M., Harada Y., Nagashima T., Wakabayashi K., Nagashima T., Kase Z., Matsushita M., Furukawa K., Nishino M. Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). *Proc. of Int. Symp. on Laser Processing of CFRP and Composites*, 2012, no. 4, pp. 119–126.
- [3] Wolynski A., Herrmanna T., Muchab P., Halouic H., L'huilliera J. Laser ablation of CFRP using picosecond laser pulses at different wavelengths from UV to IR. *Physics Procedia*, 2011, vol. 12, pp. 292–301.
- [4] Herzog D., Jaeschke P., Meier O., Haferkamp H. Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, no. 48, no. 12-13, pp. 1464–1473.
- [5] Bluemel S., Jaeschke P., Wippo V., Bastick S., Stute U., Kracht, D., Haferkamp H. Laser machining of CFRP using a high power laser — Investigation on the heat affected zone. *Physics Procedia*, 2014, no. 56, pp. 1–8.
- [6] Stock J., Zaeh M., Conrad M. Remote laser cutting of CFRP: improvements in the cut surface. *Physics Procedia*, 2012, no. 39, pp. 161–170.

- [7] Haferkamp H., Alvensleben F., Seebaum D., Goede M., Puester T. Air contaminants generated during laser processing of organic materials and protective measures. *Journal of Laser Applications*, 1998, vol. 10, no. 3, pp. 109–113.
- [8] Fujita M., Somekawa T., Miyanaga N. Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 636–639.
- [9] Graf T., Weber R. Laser applications from production to machining of composite materials. *Proceedings of EALA*, 2012, pp. 289–299.
- [10] Goeke A., Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality. *Physics Procedia*, 2010, vol. 5, pp. 253–258.

Urushadze T.B. — student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Bryzhevatykh E.Yu. — student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Bogdanov A.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.