

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.012

## **ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ПАЛLETTE ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСКРОЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ**

**Ярослав Александрович Ерисов<sup>1†</sup>, Владимир Витальевич Африкантов<sup>2</sup>,  
Юрий Сергеевич Горшков<sup>3</sup>, Василий Андреевич Разживин<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе, 34, 443086, Самара, Россия

<sup>2</sup> ООО «Мехта», пр-д Мальцева, 7е, 443022, Самара, Россия

<sup>1</sup> yaroslav.erisov@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-9750-8211>

<sup>2</sup> afrikantovvv@mehta.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5652-2818>

<sup>3</sup> usgorshkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5165-005X>

<sup>4</sup> vasia.razzhivin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

**Аннотация.** В данной работе выполнены исследования свойств и структуры материала зоны термического влияния, возникающей при лазерном раскросе металла, в зависимости от расположения заготовки на паллете: над выступом и между выступами паллеты. Показаны существенные отличия свойств и структуры на этих участках. Даны рекомендации по расположению заготовки относительно выступов паллеты. Свойства материала в зоне реза над выступом паллеты и между выступами существенно отличаются. Значения микротвердости в зоне над выступами паллеты на краю примерно на 50 % меньше, чем в зоне между выступами. По мере движения вглубь образца разница уменьшается. Содержание магния почти в два раза ниже в зоне над выступами, чем между выступами. В поверхностных слоях заготовки в зоне над выступами размеры включений по величине больше, чем в глубине. Это вызвано дополнительным закаливанием металла заготовки находящегося между выступами, и более длительным контактом с ванной жидкого металла из-за затруднения его удаления при резке на выступе паллеты. Удаление дефектного слоя методом фрезерования на глубину 0,5 мм нивелирует разницу свойств металла в зоне над выступом паллеты, между выступами и в глубине.

**Ключевые слова:** лазерный раскрой, зона термического влияния, паллета, конфигурация выступов на паллете, микроструктура, микротвердость, химический состав, изгиб, алюминиевый сплав АМг2.

---

**Для цитирования:** Ерисов Я.А., Африкантов В.В., Горшков Ю.С., Разживин В.А. Влияние положения заготовки на паллете при лазерном раскросе на формирование зоны термического влияния // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 390–397. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.012.

---

Original article

## **THE INFLUENCE OF WORKPIECE POSITION ON THE PALLET DURING LASER CUTTING ON THE FORMATION OF THE THERMAL EFFECT ZONE**

**Yaroslav A. Erisov<sup>1†</sup>, Vladimir V. Afrikantov<sup>2</sup>, Yuri S. Gorshkov<sup>3</sup>, Vasilii A. Razzhivin<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup> Samara National Research University, Moskovskoe shosse, 34, Samara, 443086, Russia

<sup>2</sup> LLC «Mehta», 7e Maltseva Ave., Samara, 443022, Russia

<sup>1</sup> yaroslav.erisov@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-9750-8211>

<sup>2</sup> afrikantovvv@mehta.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5652-2818>

<sup>3</sup> usgorshkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5165-005X>

<sup>4</sup> vasia.razzhivin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9735-5307>

**Abstract.** In this paper, the properties and material structure of the heat-affected zone, arising during laser cutting of metal, depending on the location of the workpiece on the pallet: over the protrusion and between the protrusions of the pallet were studied. Significant differences in properties and structure at these sites are shown. Recommendations on the location of the workpiece relative to the pallet's projections are given. Material properties in the cutting zone above the pallet ledge and between the ledges are significantly different. The microhardness values in the area above the pallet projections at the edge are about 50 % less than in the area between the projections. As we move deeper into the sample, the difference decreases. Magnesium content is almost two times lower in the zone above the protrusions than between the protrusions. In the surface layers of the blank in the zone above the projections the sizes of inclusions are larger than in the depth. This is caused by additional hardening of the workpiece metal located between the projections, and a longer contact with the bath of liquid metal due to the difficulty of its removal when cutting on the ledge of the pallet. Removal of the defective layer by milling to a depth of 0.5 mm levels out the difference in metal properties in the area above the pallet ledge, between the ledges and in the depth.

**Keywords:** laser cutting, thermal influence zone, pallet, configuration of protrusions on the pallet, microstructure, microhardness, chemical composition, bending, aluminum alloy AMg2.

**For citation:** Erisov, Ya. A., Afrikantov, V. V., Gorshkov, Yu. S. & Razzhivin, V. A. (2023). The effect of the position of the workpiece on the pallet during laser cutting on the formation of a zone of thermal influence. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 390–397. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.012.

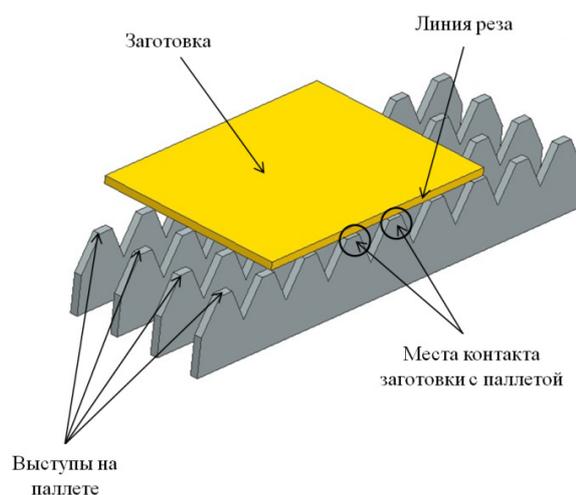
## Введение

К числу перспективных процессов разделения материалов следует отнести лазерную резку металлов, основанную на процессах нагрева, плавления, испарения, химических реакциях горения и удаления расплава из зоны реза [1-4]. В настоящее время лазерную резку применяют во всех отраслях промышленности – от раскроя листовых материалов для корпусов различных приборов до изготовления строительных конструкций, деталей машин, узлов летательных аппаратов, судов, специальных изделий. Лазерные технологии активно применяют в машиностроении, автомобилестроении, атомной, космической, авиационной и судостроительной промышленности, медицине и практически во всех направлениях оборонного производства. При лазерной резке отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал. Вследствие этого лазерную резку можно осуществлять с высокой степенью точности, в том числе легкодеформируемых и нежестких заготовок или деталей. Благодаря большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с технологическими возможностями [5-8]. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществить лазерную резку по сложному контуру плоских и объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса [9-10].

Одним из недостатков лазерной резки, помимо высокой стоимости оборудования и

сложности его обслуживания, является возникновение зоны термического влияния, структура и свойства материала которой существенно отличаются от основы. Из-за этого при последующем формообразовании заготовок, полученных методом лазерного раскроя, здесь могут образовываться трещины [11-13].

При лазерном раскрое заготовка размещается на специальном ложементе-паллете, представляющем собой основание с выступами различной формы, например трапециевидной. Назначение паллет – фиксирование заготовки в процессе ее обработки (рис.1).



**Рис.1.** Схема расположения образцов на паллете

**Fig.1.** Layout of samples on a pallet

Замечено, что положение заготовки на паллете оказывает влияние на процесс резки. Если

в зонах без выступов происходит беспрепятственное удаление расплавленного металла сжатым газом, то на выступах из-за подпора снизу жидкий металл задерживается и находится в более длительном контакте с кромкой заготовки. Визуально на заготовке это проявляется в виде почернения (прижогов) поверхности металла со стороны паллеты (рис.2).



Рис.2. Прижоги на металлической заготовке

Fig.2. Caulerization on a metal workpiece

Все это может вызвать дополнительные изменения структуры и свойств в зоне термического влияния, что еще в большей степени может сказаться на технологических и эксплуатационных свойствах изделия. В данной работе выполнено исследование влияния положения заготовки на паллете при лазерном раскрое на формирование зоны термического влияния [14-18].

### Методика исследований

Исследования проводились на листах из алюминиевого сплава АМг2 (Al – 95,9 %, Mg – 2,6 %, Fe – 0,5 %, Si – 0,5 %, Mn – 0,5 %) толщиной 2 мм. Лазерная резка производилась на установке BYSTAR 3015 (BYSTRONIC, Китай) в режиме: мощность – 2500 Вт, защитная среда – аргон, давление газа – 10 бар, фокус – 1,4 мм, скорость резания – 4 мм/с. После лазерной резки отбирались образцы, полученные в зоне между выступами на паллете и непосредственно на выступе. Кроме того, исследования проводились на образцах после удаления зоны термического влияния методом фрезерования на глубину 0,5 мм. Для всех образцов определялись следующие параметры: микротвердость, химический состав и структура материала в зоне термического влияния, а также производилась технологическая проба на изгиб.

Микротвердость по Виккерсу определялась с помощью полуавтоматического микротвер-

домера ММТ-Х7 (Matsuzawa, Япония). Измерения производились с нагрузкой 100 г. На микротвердость исследовались поперечные шлифы образцов, отобранных между выступами и на выступе паллеты. Производилось 10 замеров по ширине на расстояние 250 мкм от края заготовки, примерно через каждые 25 мкм. Измерения проводились на половине толщины заготовки (рис.3).

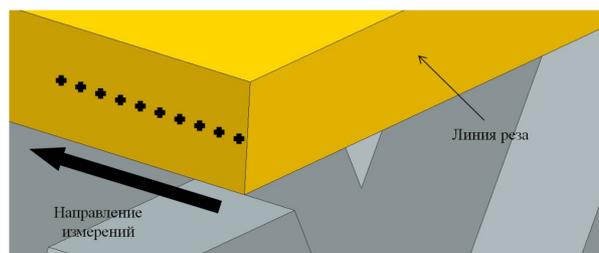


Рис.3. Схема измерений хим. состава и микротвердости образцов между выступами и на выступе паллеты

Fig.3. Scheme of measuring the chemical composition and microhardness of samples between the pins and on the pallet

Химический анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Phenom Pro X G5 (Phenom-World, Нидерланды) с энергодисперсионной приставкой. Измерения проводились также по ширине, примерно через каждые 20 мкм. Здесь и далее исследовались поперечные шлифы образцов, отобранных на выступе и между выступами паллеты. Фиксировалось содержание магния в весовых процентах.

Анализ микроструктуры материала осуществлялся на оптическом микроскопе Zeiss Axio Vert.A1 (Carl Zeiss, Германия) при увеличении 1000х. Предварительно шлифы подвергали травлению в растворе Келлера ( $\text{HNO}_3$  – 2,5 см<sup>3</sup>,  $\text{HCl}$  – 1,5 см<sup>3</sup>,  $\text{HF}$  – 1,0 см<sup>3</sup>,  $\text{H}_2\text{O}$  – 95 см<sup>3</sup>) в течение 2-4 минут.

Для изучения поведения заготовок, полученных лазерным раскроем, в процессе холодной листовой штамповки применяли технологическую пробу на изгиб. При изгибе плоской заготовки на ее наружной поверхности возникают растягивающие напряжения, которые вызывают образование трещин. По наличию трещин на кромке заготовки можно судить о деформационных возможностях материала в этой зоне. На рис.4 представлена инструментальная оснастка для гибки образцов с размерами 20x40 мм на угол 60°. Радиус скругления пуансона и матрицы 2,5 и 4 мм соответственно.



**Рис.4.** Оснастка для проведения технологической пробы на изгиб

**Fig.4.** Equipment for carrying out a technological bending test

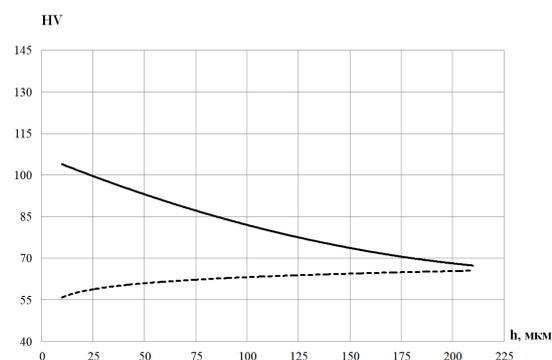
Для реализации процесса гибки использовался ручной механический пресс. Для осмотра края образцов на наличие трещин использовался оптический микроскоп Zeiss Axio Vert.A1 (Zeiss, Германия) при увеличении  $\times 100$ .

### Результаты и их обсуждение

Результаты исследования распределения микротвердости от кромки реза вглубь образца представлены на рис.5. Из графика следует, что значения микротвердости в зоне над выступами на кромке примерно на 50 % меньше, чем в зоне между выступами. По мере движения вглубь образца разница снижается и на глубине больше 250 мкм значения становятся практически одинаковыми и равными микротвердости материала основы. Это может свидетельствовать о разупрочнении материала, происходящем на выступе паллеты за счет более длительного контакта с жидким металлом. Повышение микротвердости между выступами, по-видимому, связано с эффектом закаливания. В соответствии с литературными данными [19] в сплавах системы Al-Mg с содержанием Mg до 5-6 % образуется фаза  $Al_8Mg_5$ , которая при закалке полностью растворяется в матрице твердого раствора на основе алюминия, что приводит к повышению прочности. Однако, при нагреве и медленном охлаждении происходит образование вторичных выделений фазы  $Al_8Mg_5$ , что соответственно приводит к разупрочнению матрицы.

Результаты исследований химического состава представлены на рис.6. Из графика следует, что содержание магния почти в два раза ниже в зоне над выступами, чем в зоне между выступами. Скорее всего, это вызвано как образо-

ванием выделений фазы  $Al_8Mg_5$ , так и частичным «выгоранием» магния при высоких температурах, так как температура кипения алюминия составляет  $2519^\circ$ , а у магния  $1100^\circ$ . В зоне между выступами, содержание Mg соответствует материалу основы.

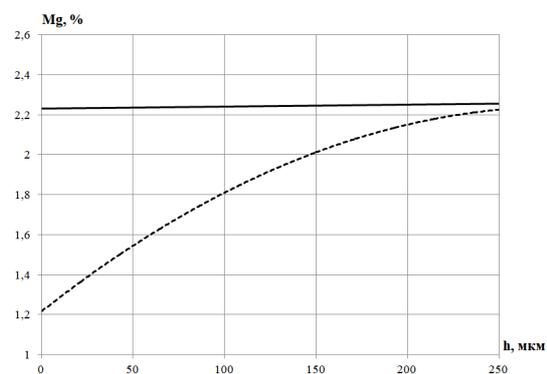


**Рис.5.** Распределение микротвердости по ширине образца от кромки вглубь:

— — между выступами; --- — на выступе паллет

**Fig.5.** Distribution of microhardness along the width of the sample from the edge into the depth:

— — between the ledges; --- — on the ledge of the pallet



**Рис.6.** Распределение содержания Mg от кромки вглубь образца:

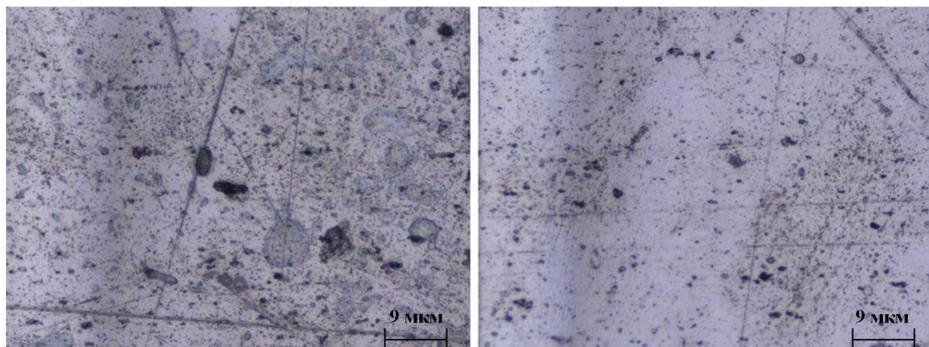
— — между выступами; --- — на выступе паллет

**Fig.6.** Distribution of Mg content from the edge deep into the sample:

— — between the ledges; --- — on the ledge of the pallet

Анализ микроструктуры образца, отобранного на выступе паллеты, показывает, что в поверхностных слоях размеры включений интерметаллидов больше, чем в глубине (рис.7). Это свидетельствует об их коагуляции и образовании вторичных выделений фазы  $Al_8Mg_5$ , что как уже было упомянуто ранее, может быть вызвано дополнительным нагревом и более длительным контактом с жидким металлом, что согласуется с данными полученными при замере микротвердости и химического состава.

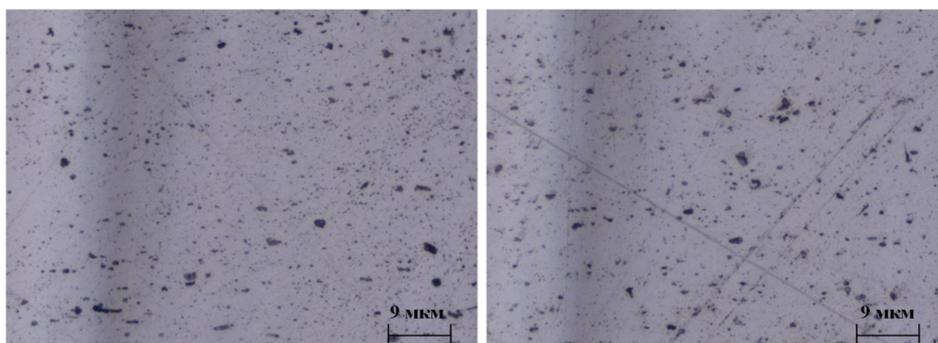
Микроструктура материала после удаления поверхности и в глубине образца (рис.8).



а) б)

**Рис.7.** Микроструктура образца сплава АМг2 отобранного на выступе паллеты:  
а – поверхностный слой, б – на глубине 0,5 мм

**Fig.7.** Microstructure of the AMg2 alloy sample selected on the pallet ledge:  
a – surface layer, b – at a depth of 0.5 mm



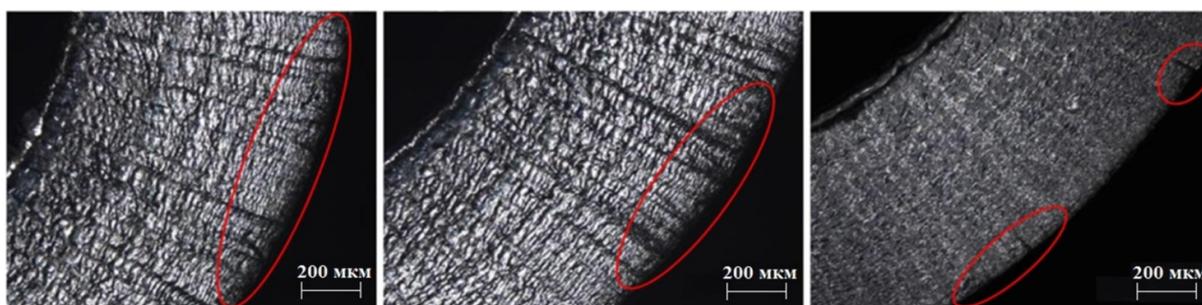
а) б)

**Рис.8.** Микроструктура образца сплава АМг2 после механической обработки кромок:  
а – поверхностный слой, б – на глубине 0,5 мм

**Fig.8.** Microstructure of the AMg2 alloy sample after edge machining:  
a – surface layer, b – at a depth of 0.5 mm

Образцы после технологической пробы на изгиб представлены на рис.9. Наибольшее количество трещин наблюдается в случаегиба образца с резом между выступами паллеты. В

случае реза над выступом трещин меньше. После снятия дефектного слоя трещины не обнаруживаются, что подтверждает результаты предыдущих исследований [20-21].



а) б) в)

**Рис.9.** Образцы с после гибки: образец, отобранный на выступе паллеты (а);  
образец, отобранный между выступами (б); образец после фрезерования (в)

**Fig.9.** Samples c after bending: the sample selected on the ledge of the pallet (а);  
the sample selected between the ledges (б); sample after milling (с)

## Выводы

Свойства материала в зоне реза над выступом паллеты и между выступами существенно отличаются. Значения микротвердости в зоне над выступами паллеты на краю примерно на 50 % меньше, чем в зоне между выступами. По мере движения вглубь образца разница уменьшается. Содержание магния почти в два раза ниже в зоне над выступами, чем между выступами. В поверхностных слоях заготовки в зоне над выступами размеры включений по величине больше, чем в глубине. Это вызвано дополнительным закаливанием металла заготовки находящегося между выступами, и более длительным контактом с ванной жидкого металла из-за затруднения его удаления при резке на выступе паллеты.

С одной стороны, более пластичный материал на кромке является как бы плакирующим слоем, защищающим от разрушения при дальнейшей обработке. С другой стороны, изменение свойств может оказать негативное влияние на эксплуатационные свойства конечного изделия.

Удаление дефектного слоя методом фрезерования на глубину 0,5 мм нивелирует разницу свойств металла в зоне над выступом паллеты, между выступами и в глубине.

Для снижения влияния положения заготовки при лазерном раскрое целесообразно назначать минимальную длину выступа на паллете, но при этом исключая образование рисков при перемещении листа, его установке и снятии с паллеты. Для выравнивания влияния выступа на паллете при резке вдоль и поперек выступов целесообразно длину выступа на паллете назначать равной толщине листа, из которого изготовлена паллета, в случае плоской вершины. Для облегчения удаления жидкого металла верхнюю часть выступа желательно выполнять по радиусу.

## Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Мурзин С.П., Осетров Е.Л., Трегуб Н.В., Малов С.А., Никифоров А.М., Трегуб В.И. Повышение пластичности алюминиевого сплава АМГ6 воздействием лазерного излучения // Известия Самарского научного центра Российской

ской академии наук. 2010. Т. 12, № 4. С. 178–181.

3. Майоров В.С., Майоров С.В., Хоменко М.Д., Гришаев Р.В. Остаточные деформации и дефекты при лазерной резке // Сб. трудов Института проблем лазерных и информационных технологий РАН. Шатура, 2014. С. 56–64.

4. Амитан Г.Л., Байсупов И.А., Барон Ю.М. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки: Под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 126 с.

5. Bogodukhov S., Kozik E., Svidenko E., Ovechkin M. Effect of Laser Hardening on Operational Properties of Single-Carbide Hard Alloys // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. V. 509. P. 805–812.

6. Ullah S., Li, X. Guo G., Rodríguez A.R., Li D., Du J., Cui L., Wei L. Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions // Materials Today Communications. 2022. V. 33. P. 104236.

7. Morimoto K., Yagi A., Kai N., Okamoto Y., Okada, A., Ishiguro H., Ito R., Sugiyama A., Okawa H. Fiber laser cutting of steel materials with twin spot beam-twin spot setting in kerf width direction // Journal of Laser Applications. 2022. V. 34, N 4. P. 042009.

8. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С., Крымов В.В. Авиационное материаловедение и технология обработки металлов. М.: Высш. шк., 1998. 444 с.

9. Levichev N., Rodrigues G.C., Duflo J.R. Real-time monitoring of fiber laser cutting of thick plates by means of photodiodes // Procedia CIRP. 2020. V. 94. P. 499–504.

10. He Y., Xie H., Ge Y., Lin Y., Yao Z., Wang B., Jin M., Liu J., Chen X., Sun Y. Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy // Processes. 2022. V. 10, N 4. P. 732.

11. Блинков В.В., Макашов А. Моделирование процесса лазерной резки металлов с неактивным вспомогательным газом // В сборнике трудов Международной конференции «Промышленный лазер и лазерное применение». 1995. С. 250–255.

12. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной В.К. Металловедение: В 2 т. Т.1: Основы металловедения. М.: Издательский дом МИСиС, 2009. 496 с.

13. Гречников Ф.В., Горшков Ю.С., Мишин А.М. Исследование влияния способа раскроя листовой алюминиевой заготовки на трещинообразование при холодной листовой штамповке // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 17. С.454–457.

14. Nagasaka A., Kubota Y., Sugimoto K., Mio A., Hojo T., Makii K., Kawajiri M., Kitayama M. Effect of YAG laser cutting on stretch-flangeability of ultra high strength TRIP sheet steel with bainitic ferrite matrix // ISIJ International. 2010. V. 50. N 10. P. 1441–1446.

15. Thomas D.J. The effect of laser cutting parameters on the formability of complex phase steel // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. V. 64. P. 9–12.

16. Miraoui I., Boujelbene M., Zaied M. High-power laser cutting of steel plates: Heat affected zone analysis // Advances in Material Science and Engineering. 2016. P. 1242565.

17. Chatterjee B., Mandal K. K., Kuar A. S., Mitra S. Parametric study of heat affected zone (HAZ) width in laser micro-drilling of copper sheet // ELK Asia Pacific Journals. 2016. Spec. Iss. 978-81-930411-8-5.

18. Костенко А.И. Микроструктурный анализ зоны термического влияния после лазерной резки образцов листовых материалов и их механические характеристики // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2010. Т. 46. С. 114–127.

19. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография. Москва: Изд. Дом МИСиС, 2010. 511 с.

20. Gorshkov Y.S., Erisov Y.A., Petrov I.N. etc. Effect of the Heat-Affected Zone Formed during Laser Cutting on the Bending of an Aluminum Alloy Workpiece // Russian Metallurgy (Metally). 2021. V. 10. P. 1304–1308.

21. Горшков Ю.С., Ерисов Я.А., Петров И.Н. и др. Влияние зоны термического воздействия, образующейся при лазерном раскрое, на процесс гибки заготовки из алюминиевого сплава // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 24–28.

#### Информация об авторах

Я. А. Ерисов – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.

В. В. Африкантов – генеральный директор ООО «Мехта».

Ю. С. Горшков – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.

В. А. Разживин – инженер кафедры обработки металлов давлением Самарского университета.

#### References

1. Grigoryants, A. G. (1989). Fundamentals of laser processing of materials. M.: Mechanical Engineering. P. 304. (In Russ.).

2. Murzin, S. P., Osetrov, E. L., Tregub, N. V., Malov, S. A., Nikiforov, A. M. & Tregub, V. I. (2010). Increasing the plasticity of aluminum alloy AMG6 by laser radiation. *Izvestia. Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 12(4), 178–181. (In Russ.).

3. Mayorov, V. S., Mayorov, S. V., Khomenko, M. D. & Grishaev, R. V. (2014). Residual deformations and defects in laser cutting. *Proceedings of the Institute of Problems of Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences*, Shatura, P. 56–64. (In Russ.).

4. Amitan, G. L., Baysupov, I. A. & Baron, Yu. M. (1988). Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods: Under the general editorship of V. A. Volosatov. L.: Mechanical engineering. Leningr. otd-nie. P. 126. (In Russ.).

5. Bogodukhov, S., Kozik, E., Svidenko, E. & Ovechkin, M. (2023). Effect of Laser Hardening on Operational Properties of Single-Carbide Hard Alloys. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 509, 805–812.

6. Ullah, S., Li, X., Guo, G., Rodríguez, A. R., Li, D., Du, J., Cui, L. & Wei, L. (2022). Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions. *Materials Today Communications*, 33, 104236.

7. Morimoto, K., Yagi, A., Kai, N., Okamoto, Y., Okada, A., Ishiguro, H., Ito, R., Sugiyama, A. & Okawa, H. (2022). Fiber laser cutting of steel materials with twin spot beam-twin spot setting in kerf width direction. *Journal of Laser Applications*, 34(4), 042009.

8. Abramov, N. V., Eliseev, Yu. S. & Krymov, V. V. Aviation (1998). Materials science and technology of metal processing. Moscow: Higher School. P. 444. (In Russ.).

9. Levichev, N., Rodrigues, G. C. & Duflou, J. R. (2020). Real-time monitoring of fiber laser cut-

- ting of thick plates by means of photodiodes. *Procedia CIRP*, 94, 499–504.
10. He, Y., Xie, H., Ge, Y., Lin, Y., Yao, Z., Wang, B., Jin, M., Liu, J., Chen, X. & Sun, Y. (2022). Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy. *Processes*, 10(4), 732.
11. Blinkov, V. & Makashov, A. (1995). Simulation of the process of laser cutting of metals with inactive auxiliary gas. *Proceedings of the International Conference on Industrial Laser and Laser Application*, 250–255. (In Russ.).
12. Novikov, I. I., Zolotarevsky, V. S. & Portnoy, V. K. (2009). *Metallovedenie*. Moscow: Publishing House MISIS. P. 496. (In Russ.).
13. Grechnikov, F. V., Gorshkov, Yu. S. & Mishin, A. M. (2015). Investigation of the effect of the method of cutting aluminum sheet billet on cracking during cold sheet stamping. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 17, 454–457. (In Russ.).
14. Nagasaka, A., Kubota, Y., Sugimoto, K., Mio, A., Hojo, T., Makii, K., Kawajiri, M. & Kitayama, M. (2010). Effect of YAG laser cutting on stretch-flangeability of ultra high strength TRIP sheet steel with bainitic ferrite matrix. *ISIJ International*, 50(10), 1441–1446.
15. Thomas, D. J. (2012). The effect of laser cutting parameters on the formability of complex phase steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 9–12.
16. Miraoui, I., Boujelbene, M. & Zaied, M. (2016). High-power laser cutting of steel plates: Heat affected zone analysis. *Advances in Material Science and Engineering*, 1242565.
17. Chatterjee, B., Mandal, K. K., Kuar, A. S. & Mitra, S. (2016). Parametric study of heat affected zone (HAZ) width in laser micro-drilling of copper sheet. *ELK Asia Pacific Journals*, 978-81-930411-8-5.
18. Kostenko, A. I. (2010). Microstructural analysis of the zone of thermal influence after laser cutting of samples of sheet materials and their mechanical characteristics. *Open information and computer integrated technologies*, 46, 114–127. (In Russ.).
19. Belov, N. A. (2010). Phase composition of industrial and promising aluminum alloys: monograph. Moscow: Ed. House of MISIS. P. 511. (In Russ.).
20. Gorshkov, Y. S., Erisov, Ya. A. & Petrov, I. N. et al. (2021). Effect of the Heat-Affected Zone Formed during Laser Cutting on the Bending of an Aluminum Alloy Workpiece. *Russian Metallurgy (Metallically)*, 10, 1304–1308.
21. Gorshkov, Yu. S., Erisov, Ya. A. & Petrov, I. N. et al. (2021). The influence of the thermal impact zone formed during laser cutting on the bending process of the aluminum alloy workpiece. *Deformation and destruction of materials*, 1, 24–28. (In Russ.).

#### Information about the authors

Ya. A. Erisov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal Processing by Pressure of Samara University.

V. V. Afrikantov – General Director of LLC «Mehta».

Yu. S. Gorshkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Processing by Pressure of Samara University.

V. A. Razzhivin – Engineer of the Department of Metal Processing by Pressure of Samara University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 04.07.2023; принята к публикации 15.07.2023.

The article was received by the editorial board on 08 June 23; approved after reviewing 04 July 23; accepted for publication 15 July 23.