

### Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного маломощного лазера

В. В. Куц <sup>1</sup>, В.С. Меркулов <sup>1</sup>, А. Н. Гречухин <sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

#### Резюме

**Цель исследования.** Аппробация способа аддитивного формирования легкоплавких материалов, с применением твердотельного (иттербиевого) лазера низкой мощности (максимальная мощность 50 Вт). Проведены серии экспериментов, в результате которых были получены элементы режима формообразования, обеспечивающие формообразование изделий без полного расплавления материала построения с сохранением формы заготовки. Таким образом, была подтверждена возможность использования данного типа оборудования для формообразования аддитивным способом изделий из легкоплавких материалов, что является основой для дальнейших исследований на других материалах, а также дополнительного применения защитной атмосферы.

**Методы.** Для проведения экспериментов были применены методы планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных.

**Результаты.** Подтверждена возможность использования лазера низкой мощности для поставленных задач. Получены диапазоны значений режимов формообразования, которые обеспечивают формирование аддитивным способом изделий из легкоплавких материалов методом частичного оплавления.

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения твердотельного лазера низкой мощности для формообразования аддитивным методом изделий из легкоплавких материалов. Использование результатов данного исследования позволит проводить дальнейшие разработки формообразования аддитивным методом других металлов (таких, как медь или алюминий), для которых необходимо модернизировать оборудование в части создания защитной атмосферы в зоне расплава, а также увеличения мощности лазера.

---

**Ключевые слова:** аддитивные технологии; эксперимент; твердотельный лазер; плавление; лазерная наплавка.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Куц В. В., Меркулов В.С., Гречухин А. Н. Исследование процесса аддитивного формирования легкоплавких материалов с использованием твердотельного маломощного лазера // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 8-17. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.

Поступила в редакцию 31.07.2020

Подписана в печать 28.10.2020

Опубликована 30.12.2020

## Study of the Process of Additive Formation of Low-Melting Materials by Means of a Low-Power Solid-State Laser

Vadim V. Kuts<sup>1</sup>, Vadim S. Merkulov<sup>1</sup>, Alexander N. Grechukhin<sup>1</sup> ✉

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: agrechuhin@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Testing a method for additive formation of low-melting materials through the use of a low-power solid-state (ytterbium) laser (maximum power 50 W). A series of experiments have been carried. As a result of those experiments, the elements of shaping mode have been obtained. They ensure the shaping of products without complete melting of the construction material while preserving the shape of a rough workpiece. Thus, the possibility of using this type of equipment for shaping products from low-melting materials in an additive way has been confirmed, which is the basis for further research on other materials, as well as the additional use of a shielding atmosphere.

**Methods.** Methods of experiment planning and empirical data processing have been used for conducting experiments.

**Results.** The possibility of using a low-power laser for the set tasks has been confirmed. Values ranges of shaping modes have been obtained, which ensure the formation of products made of low-melting materials by the partial melting technique through an additive method.

**Conclusion.** The experimental studies have shown that a low-power solid-state laser can be applied for shaping products made of low-melting materials using an additive method. Applying the results of this study will allow further development of additive shaping of other metals (such as copper or aluminum), for which it is necessary to upgrade the equipment in terms of creating a shielding atmosphere in the melt zone, as well as increasing the laser power.

**Keywords:** additive technologies; experiment; solid-state laser; melting; laser surface coating.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Kuts V. V., Merkulov V. S., Grechukhin A. N. Study of the Process of Additive Formation of Low-Melting Materials by Means of a Low-Power Solid-State Laser. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 8-17 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-8-17>.

Received 31.07.2020

Accepted 28.10.2020

Published 30.12.2020

## Введение

Аддитивные технологии – это технологии послойного наращивания и синтеза объектов. Они нашли широкое применение в производстве и промышленности и позволяют в короткие сроки получить изделие или его прототип, выполненный с достаточно высокой точностью. Основным недостатком данных технологий является сравнительно высокая стоимость оборудования, а также сложность при получении изделий и деталей высокой точности, не требующих дальнейшей обработки [1-3].

Одним из методов аддитивного формообразования является формообразование лазером. Лазером возможно сплавлять как порошки, так и твердые материалы. Применение твердотельного лазера низкой мощности для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления оправдано благодаря сравнительно низкой стоимости оборудования, возможности изменения большого числа параметров работы и точного позиционирования лазерного луча [4-6].

Лазерное оборудование нашло широкое применение в промышленности для наплавки, гравировки, резки, сварки и других процессов. Основными преимуществами использования твердотельного лазера низкой мощности являются:

- возможность точно дозировать энергию, время воздействия, глубину

проплавления, ширину зоны воздействия;

- отсутствие термических поволок и минимизация зоны термического влияния вследствие быстрого локального нагрева и охлаждения;

- сравнительно невысокая стоимость оборудования [8-10].

Целью данного исследования является выявление возможности использования твердотельного лазера низкой мощности (до 50 Вт) для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления. Частичное оплавление необходимо для того, чтобы была возможность сплавлять большое количество слоев без потери формы заготовки. Задачей эксперимента является выявление режимов аддитивного формообразования твердотельным лазером, при котором происходит частичное оплавление предыдущего и последующего слоев.

## Материалы и методы

Для эксперимента были использованы заготовки из олова диаметром 1 мм в связи с тем, что данный материал имеет невысокую стоимость, хорошую обрабатываемость, сохраняет форму после укладки и сравнительно низкую температуру плавления [7, 11].

Для достижения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования. Суть экспериментальных исследований заключалась в выявлении элементов режимов образования твер-

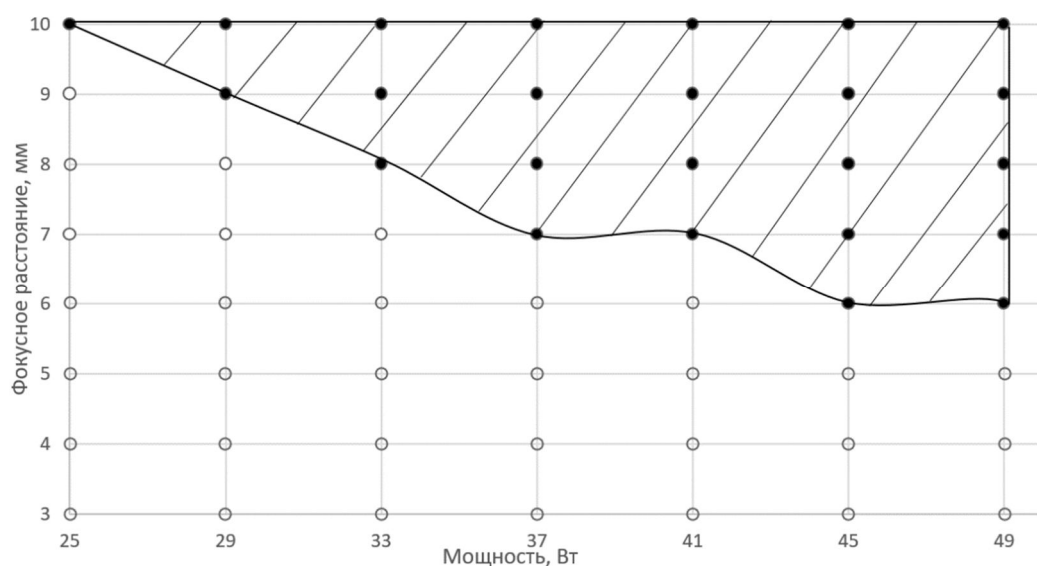
дотельным лазером изделий из легкоплавких материалов, а также построение диапазонов регулирования параметров, которые обеспечивают частичное оплавление предыдущего и последующих слоев. К таким элементам режимов относятся: мощность лазера  $P$ , Вт; скорость перемещения луча, мм/с; фокусное расстояние, мм. Эксперименты будут проводиться без применения защитного газа. Оборудование, которое будет использовано: лазер твердотельный (иттербиевый) максимальной мощностью 50 Вт (производство Россия). Зона воздействия лазера была подобрана исходя из диаметра заготовки и составляет его половину – 0,5 мм. Для вывода общего режима было решено использовать одну заготовку диаметром 1 мм для большей наглядности оплавления поверхности.

Результатом экспериментов является подтверждение возможности исполь-

зования твердотельного лазера низкой мощности (до 50 Вт) для аддитивного формирования легкоплавких материалов методом частичного оплавления, а также получения элементов режима формообразования без полного расплавления с сохранением формы заготовки [12-14].

### Результаты и их обсуждение

Первая серия экспериментов включает в себя зависимость оплавления от фокусного расстояния и мощности лазера. Скорость перемещения лазера была неизменна – 50 мм/с. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов формообразования, такое, как фокусное расстояние и мощность, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.



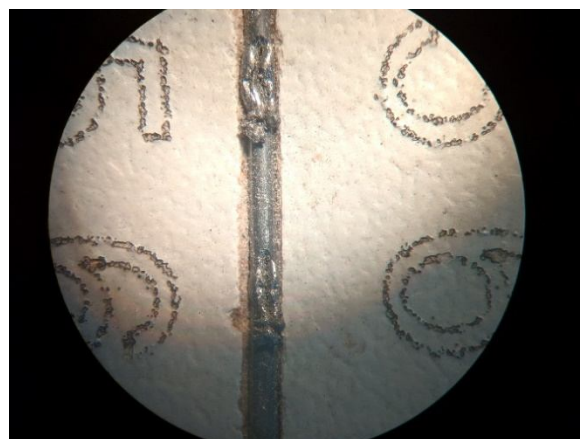
**Рис. 1.** Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

**Fig. 1.** Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer

В нижней части рис. 1 при фокусном расстоянии меньше 5 мм наблюдалось испарение металла. На рис. 2 показано расплавление при фокусном расстоянии + 5 мм и мощности 45 Вт. Наиболее удовлетворительные результаты расплавления достигнуты при мощности 40-50 Вт и наибольшем для данного эксперимента фокусном расстоянии.

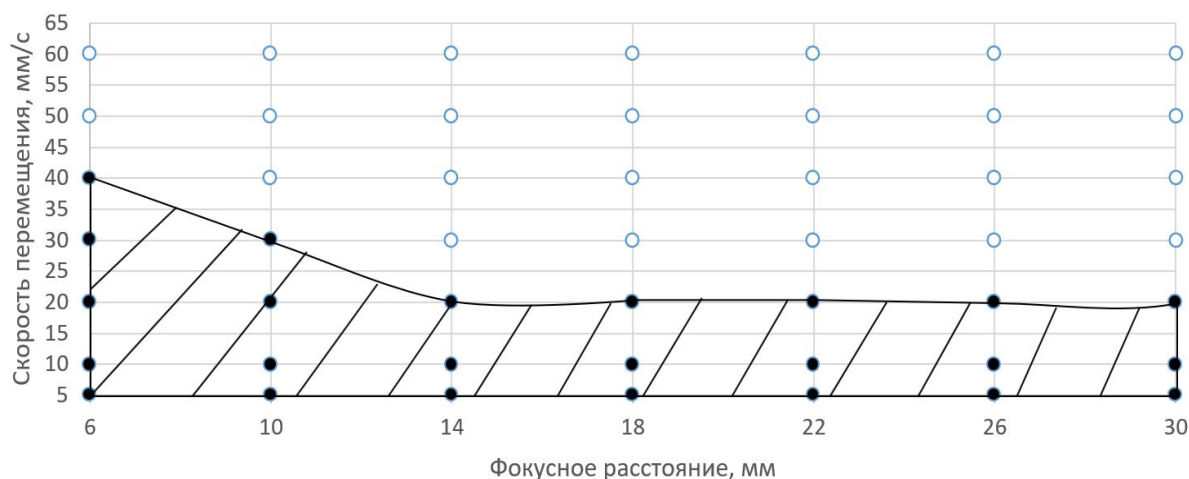
Следующая серия экспериментов была направлена на выявление зависимости расплавления от скорости перемещения и фокусного расстояния. Исходя из результатов прошлой серии опытов мощность установлена равной 40 Вт. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов форм-

мообразования, такое, как скорость перемещения и фокусное расстояние, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.



**Рис. 2.** Внешний вид оплавления при высокой мощности и фокусном расстоянии +5 мм

**Fig. 2.** Appearance of reflow at high power and focal length +5 mm



**Рис.3.** Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

**Fig. 3.** Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer

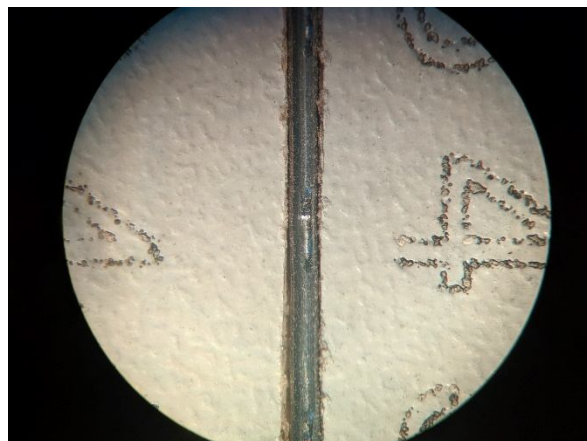
В данной серии экспериментов при фокусном расстоянии до 6 мм наблюдался прожиг заготовки. При дальнейшем увеличении фокусного расстояния

поверхностное оплавление заготовки становилось более равномерным и точным. При высокой скорости перемещения температурное влияние слишком

мало для плавления на установленной мощности, как видно на рис. 4 и в верхней части графика. Фокусное расстояние, необходимое для частичного расплавления заготовки, находится в диапазоне 20-30 мм при скорости перемещения 5-20 мм/с.

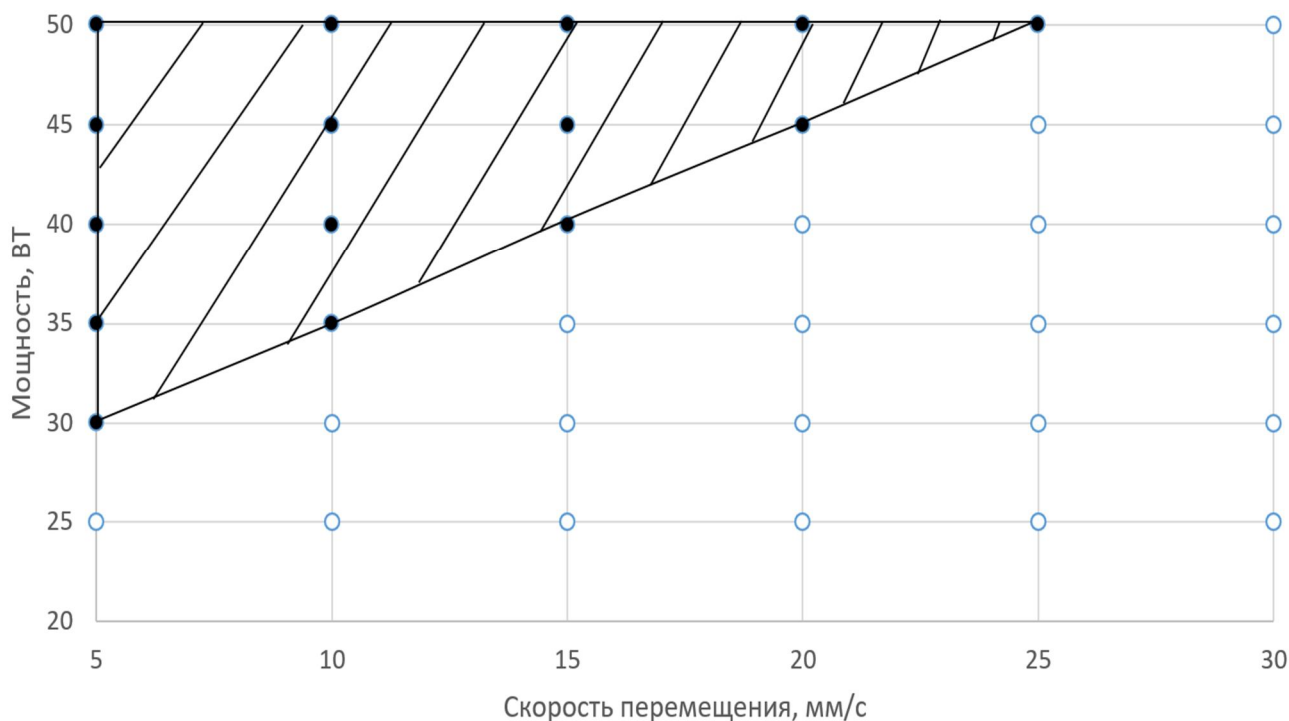
В третьей серии экспериментов за основу взято фиксированное фокусное расстояние, а изменяются мощность и скорость перемещения. Исходя из результатов прошлой серии опытов фокусное расстояние установлено 20 мм. Результаты эксперимента представлены на рис. 5. В частности, заштрихованная область означает числовое значение режимов элементов формообразования, такое, как мощность и скорость пере-

мещения, при которых обеспечивается частичное оплавление последующего и предыдущего слоя.



**Рис. 4.** Внешний вид оплавления при низкой мощности лазера и высокой скорости перемещения

**Fig. 4.** Appearance of reflow at low laser power and high travel speed



**Рис. 5.** Режимы аддитивного формообразования, обеспечивающие частичное оплавление последующего и предыдущего слоя

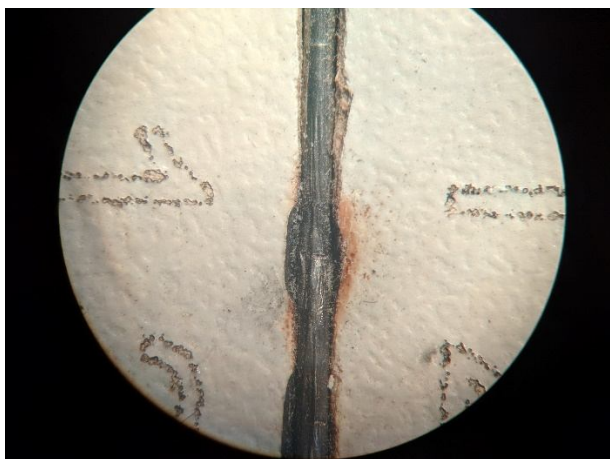
**Fig. 5.** Additive shaping modes that provide partial melting of the next and previous layer



При высокой скорости перемещения и низкой мощности лазерного луча энергии для расплавления недостаточно. Как видно из графика, параметры, необходимые для частичного расплавления заготовки, находятся в следующих пределах:

- мощность: от 35 до 45 Вт;
- скорость перемещения: от 5 до 15 мм/с.

На рис. 6 показан внешний вид искомого оплавления при параметрах, указанных выше. Заготовка равномерно оплавляется без прожигов, и при этом сохраняет первоначальную форму.



**Рис. 6.** Внешний вид оплавления при мощности лазера 45 Вт и скорости перемещения 10 мм/с

**Fig. 6.** Appearance of reflow at a laser power of 45 W and a travel speed of 10 mm / s

В ходе дальнейшего анализа на основе результатов проведенных экспериментов были установлены режимы для формообразования аддитивным методом изделий из легкоплавких матери-

алов (материал – олово, диаметр заготовки – 1 мм).

После проведения серии опытов, целью которых было формообразование аддитивным методом без полного расплавления, был выведен точный режим:

- ширина линии лазерного луча: 0,5 мм;
- скорость: 9 мм/с;
- мощность: 38 Вт;
- фокусное расстояние: +25 мм от уровня стола.

## Выводы

Таким образом, подтверждена возможность применения твердотельного (иттербиевого) лазера низкой мощности (максимальная мощность 50 Вт) для решения задачи формообразования аддитивными методами. Проведены серии экспериментов и были выявлены зависимости режимов оплавления проволоки от изменения параметров (мощности, Вт; фокусного расстояния, мм; скорости перемещения, мм/с). На основе проведенных экспериментов были получены режимы формообразования аддитивным методом без полного расплавления легкоплавких материалов. Для дальнейших исследований возможности формообразования аддитивным методом других металлов (таких, как медь или алюминий), необходимо модернизировать оборудование, создать защитную атмосферу в зоне расплава, а также увеличить мощность лазера.

### Список литературы

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И.Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки / под. ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. С. 641.
2. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Особенности формирования структуры и микрогеометрии поверхности лазерных наплавов с использованием многоканального CO<sub>2</sub> - лазера // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №11 (143). С. 19-22.
3. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Тарлыков В.А. Основы лазерной техники. Л.: Машиностроение, 1990. С. 316.
4. Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки / Ф. Берtrand, И. Мовчан, М.Н. Самодурова, Н.С. Джигун // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №2. С. 44-52.
5. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С.664.
6. Промышленная лазерная наплавка: современное состояние и тенденции / Е.М. Биргер, Г.В. Москвитин, А.Н. Поляков, В.Е. Архипов // Сварочное производство. 2009. № 9. С. 32-42.
7. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Чжан Цин. Формирование наплавленных слоев с использованием лазерного импульсно-периодического излучения // Сварочное производство. 2007. № 8. С. 18-21.
8. Технологические особенности формирования структуры лазерных наплавов с использованием излучения мощных волоконных лазеров / Р.Н. Корешков, В.Н. Петровский, П.С. Джумаев, В.И. Польский // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 5. С. 30-34
9. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А. Лазерная и криогенная обработка быстрорежущей стали. Тверь, 2014. 96 с.
10. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным CO<sub>2</sub>-лазером / Л.Е. Афанасьева, И.А. Барабонова, Е.В. Ботянов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8 (104). С. 10-13.
11. Югов В.И. Лазерное термоупрочнение – высокоэффективная технология ресурсосбережения // Лазер-Информ. 2008. № 23. С. 1-8.
12. Ion J.C. Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application. Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. 576 p.
13. Thivillon L., Pervushin D., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition // International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008), Maastricht, June 2-4, 2008.
14. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser cladding. Boca Raton: CRS Pres, 2005. 280 p.



## References

1. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ. Moscow, 2006. 641 p. (In Russ.).
2. Yugov V. I., Afanasyeva L. E., Novoselova M. V. Osobennosti formirovaniya struktury i mikrogeometrii poverkhnosti lazernykh naplavok s ispol'zovaniem mnogokanal'nogo CO<sub>2</sub> - lazera [Features of formation of structure and microgeometry of the surface of laser surfacing using a multichannel CO<sub>2</sub> laser]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2016, no. 11 (143), pp. 19-22 (In Russ.).
3. Krylov K. I., Prokopenko V. T., Tarlykov V. A. *Osnovy lazernoi tekhniki* [Fundamentals of laser technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1990. 316 p. (In Russ.).
4. Bertrand F., Movchan I., Samodurova M. N., Dzhigun N. S. Lazernaya naplavka kak perspektivnyi metod uprochneniya shtampovoi osnastki [Laser cladding as a promising hardening method of stamping equipment]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 44-52 (In Russ.).
5. *Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nykh i issledovaniy i prikladnykh razrabotok* [Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental and applied research and developments]. Edited by V. Ya. Panchenko. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 664 p. (In Russ.).
6. Birger E. M., Moskvitin G. V., Polyakov A. N., Arkhipov V. E. Promyshlennaya lazernaya naplavka: sovremennoe sostoyanie i tendentsii [Industrial laser surfacing: current state and trends]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2009, no. 9, pp. 32-42 (In Russ.).
7. Grigoryants A. G., Misyurov A. I., Zhang Qing. Formirovanie naplavlennykh sloev s ispol'zovaniem lazernogo impul'sno-periodicheskogo izlucheniya [Formation of deposited layers using laser pulse-periodic radiation]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding Production*, 2007, no. 8, pp. 18-21 (In Russ.).
8. Koreshkov R.N., Petrovsky V. N., Dzhumaev P. S., Polsky V. I. Tekhnologicheskie osobennosti formirovaniya struktury lazernykh naplavok s ispol'zovaniem izlucheniya moshchnykh volokonnykh lazerov [Technological features of forming the structure of laser surfacing using high-power fiber laser radiation, metal Science and heat treatment of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2014, no. 5, pp. 30-34 (In Russ.).
9. Afanasieva L. E., Barabanov I. A. *Lazernaya i kriogennaya obrabotka bystrorezhushchei stali* [Laser and cryogenic treatment of high speed steel]. Tver, 2014. 96 p. (In Russ.).
10. Afanasyeva L. E., Barabanova I. A., Botyanov E. V. et al. Strukturnye fazovye prevrashcheniya v bystrorezhushchei stali pri lazernoi zakalke s oplavleniem poverkhnosti

mnogokanal'nym CO<sub>2</sub>-lazerom [Structural phase transformations in high-speed steel during laser quenching with surface reflow with a multi-channel CO<sub>2</sub> laser]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, no. 8 (104), pp. 10-13 (In Russ.).

11. Yugov V. I. Lazernoe termouprochnenie - vysokoeffektivnaya tekhnologiya resursosberezheniya [Laser thermal strengthening - a highly efficient resource-saving technology]. *Laser-inform = Laser-inform*, 2008, no. 23, pp. 1-8 (In Russ.).

12. Ion J. C. *Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application*. Burlington, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 576 p.

13. Thivillon L., Pervushin D., Bertrand Ph., Smurov I. Industrial technology of laser assisted direct metal deposition. *International Thermal Spraying Conference (ITSC-2008)*, Maastricht, June 2-4, 2008.

14. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. *Laser cladding*. Boca Raton: CRS Pres, 2005. 280 p.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Куц Вадим Васильевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-1359>

**Vadim V. Kuts**, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-1359>

**Меркулов Вадим Сергеевич**, аспирант, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mikul46@yandex.ru

**Vadim S. Merkulov**, Post-Graduate Student Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mikul46@yandex.ru

**Гречухин Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра машиностроительных технологий и оборудования, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: agrechuhin@mail.ru

**Alexander N. Grechukhin**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-Building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: agrechuhin@mail.ru