

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №4 (142). С. 30-36.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №4 (142). P. 30-36.

Научная статья  
УДК 621.7/620.3  
doi:

## Формирование гетерофазной структуры зон лазерного легирования в алюминиевых сплавах для повышения антифрикционных свойств поверхности

Лариса Георгиевна Петрова<sup>1</sup>, д.т.н.,  
Виктор Дмитриевич Александров<sup>2</sup>, д.т.н.,  
Максим Витальевич Морщилов<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),  
Москва, Россия

<sup>1</sup> petrova\_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

<sup>2</sup> info@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1344-4263>

<sup>3</sup> info@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4655-8507>

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы поверхностного легирования алюминиевых сплавов с применением метода лазерного поверхностного легирования (ЛПЛ). В рамках исследования смоделированы поверхностные потоки и поля скоростей при лазерном легировании. Проанализировано строение зон, легированных с помощью ЛПЛ, а также проведена оценка антифрикционных свойств полученных гетерофазных структур.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ), антифрикционные свойства, гетерофазные структуры

**Благодарности:** Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

**Для цитирования:** Петрова Л.Г., Александров В.Д., Морщилов М.В. Формирование гетерофазной структуры зон лазерного легирования в алюминиевых сплавах для повышения антифрикционных свойств поверхности // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 4 (142). С. 30–36. doi:

## Formation of a heterophase structure of laser doping zones in aluminum alloys for the improvement of antifriction properties of the surface

Larisa G. Petrova<sup>1</sup>, D. Eng.,  
Viktor D. Alexandrov<sup>2</sup>, D. Eng.,  
Maxim V. Morshchilov<sup>3</sup>, Ph.D. Eng.,

<sup>1, 2, 3</sup> Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI), Moscow, Russia

<sup>1</sup> info@madi.ru,

<sup>2</sup> petrova\_madi@mail.ru,

<sup>3</sup> info@madi.ru.

**Abstract.** The issues of laser doping of aluminum alloy surfaces using laser doping technique (LDT) are viewed. Within the framework of studies surface currents and velocity fields using laser doping are modeled. The structure of the zones subjected to LDT has been analyzed, and antifriction properties of the obtained heterophase structures have been investigated.

**Keywords:** aluminum alloys, laser doping (LD), antifriction properties, heterophase structures

**Acknowledgements:** The material was prepared as part of scientific research under the project No.FSFM 2020 0011 (2019 1342), experimental studies were conducted using the equipment of the MADI collective use center.

**For citation:** Petrova L.G., Alexandrov V.D., Morshilov M.V. Formation of a heterophase structure of laser doping zones in aluminum alloys for the improvement of antifriction properties of the surface / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2023. № 4 (142). P. 30–36. doi:

Для улучшения рабочих свойств поверхностей алюминиевых деталей и повышения антифрикционных характеристик при работе в парах трения используются различные методы поверхностной упрочняющей обработки, среди которых особое место занимают способы воздействия с использованием энергии лазерного луча: лазерная термообработка и лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ) [1 – 3].

Метод ЛПЛ позволяет целенаправленно изменять химический состав поверхностного слоя обрабатываемых материалов, что, в сочетании со специфическими условиями формирования зон легирования (высокой температурой нагрева, большими скоростями охлаждения и значительной степенью переохлаждения расплава в момент кристаллизации) дает возможность получать на поверхности деталей легированные слои, обладающие уникальными физико-химическими и механическими свойствами [4 – 5]. Внедрение в поверхностный слой алюминиевого сплава различных легирующих компонентов, происходящее под воздействием лазерного излучения, позволяет модифицировать свойства поверхности, улучшая ее эксплуатационные характеристики в соответствии с конкретными условиями работы [6]. Практически ЛПЛ осуществляют в непрерывном и импульсном режиме работы лазера в широком диапазоне технологических параметров

– мощности излучения, времени воздействия, величины расфокусировки лазерного пучка.

Основная идея формирования антифрикционного поверхностного слоя связана с использованием принципа Шарпи, предусматривающего создание в поверхностном слое неоднородной структуры типа «твердые включения в мягкой матрице» [7]. Как показали выполненные ранее исследования, при проведении обработки алюминия и его сплавов в режиме локального оплавления зон лазерного воздействия увеличивается разнообразие возможных механизмов массопереноса в ванне расплава [8], что создает предпосылки для формирования гетерофазной структуры при последующей кристаллизации.

Цель данной работы заключается в проведении теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации структуры зон лазерного легирования в алюминиевых сплавах для повышения антифрикционных свойств поверхностей деталей.

### Методика проведения исследований

Исследования проводили на образцах алюминиевых сплавов АЛ25 (системы Al–Si) и Д16 (системы Al–Cu), химические составы которых приведены в табл. 1.

### 1. Химические составы исследуемых алюминиевых сплавов

Сплав	Содержание элементов, % масс.				
	Si	Cu	Mg	Mn	Другие элементы
АЛ25	11...13	1,5...3,0	0,08...0,13	0,3...0,6	0,8...1,3 Ni
Д16	0,5	3,8...4,5	1,2...1,8	0,3...0,9	0,2 (Ti + Zn)

Процесс ЛПЛ проводили с использованием технологического лазера непрерывного действия «Комета-1» по режимам, обеспечивающим расплавление поверхностного слоя. Порошкообразный легирующий материал входил в состав обмазок, наносимых на поверхность

образцов в качестве основного компонента. Толщина обмазок варьировалась от 0,1 до 0,4 мм и подбиралась экспериментально в зависимости от желательных размеров зоны проплавления и степени ее заполнения легирующим веществом. Дисперсность используемых

порошков соответствовала 5...15 мкм. В качестве легирующей добавки использовали дисилицид ниобия NbSi<sub>2</sub>, слои на основе которого в предыдущих исследованиях показали наилучшие результаты, как по заполнению алюминиевой ванны расплава, так и по микротвердости [6, 8].

С целью теоретического обоснования физических процессов, происходящих в ванне расплава, было выполнено компьютерное моделирование установившегося течения жидкости в объеме, обладающим осевой симметрией, и процесса заполнения ванны расплава твердыми частицами.

Исследования микроструктуры образцов проводили на протравленных микрошлифах в оптическом микроскопе Neophot-21. Распределение легирующих элементов в легированной зоне изучали при помощи микрорентгеноспектрального анализатора «Camebax-micro» с применением соответствующих K $\alpha$ -излучений. Проводили анализ РЭМ-изображений микрошлифов в поглощенных и вторичных электронах, а также в характеристическом излучении элементов.

Для оценки антифрикционных свойств поверхностно легированных сплавов определяли коэффициенты трения и их зависимость от времени работы трущейся пары. Испытания проводили на установке ХТИ-85, в качестве контртела использовали диск из закаленной стали 45 (с твердостью 46...48 HRC). Значения рабочих нормальных нагрузок и скоростей скольжения соответствовали диапазону внешних параметров, не приводящих к изменению физических свойств трибопленки.

## Результаты и их обсуждение

### Моделирование конвективных потоков и полей скоростей при лазерном легировании.

В процессе ЛПЛ насыщение металла легирующими компонентами происходит в результате диффузии и массопереноса в жидкой фазе при возможно конвективном или чисто механическом перемешивании расплава в зоне воздействия лазерного излучения [9], что влияет на характер распределения легирующей добавки.

Визуализация объемного распределения легирующего вещества в обрабатываемой зоне проведена путем моделирования формы конвективных потоков и распределения скоростей, возникающих в замкнутом объеме течения при помощи специально разработанной компьютерной программы. Программа позволяет прогнозировать изменение характера течения при качественном и количественном изменении параметров среды. Вычислительные методы, реализованные в программе, относятся к классу методов граничных элементов.

Для визуального представления результатов расчетов применена дискретизация области, занятой жидкостью, которая разбивается на треугольные ячейки (рис. 1), и производятся вычисления в узлах сетки. Шаг дискретизации – параметр, который задает размеры сторон треугольников во внутренней части исследуемой области течений. Граница расчетной области разбивается на участки, длина которых также равна выбранному шагу дискретизации.

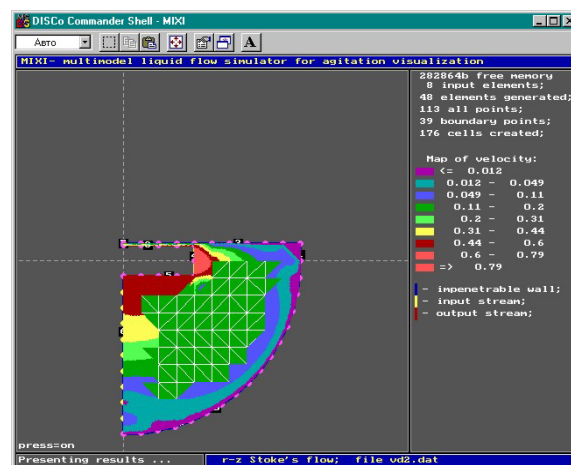


Рис. 1. Интерфейс компьютерной программы расчета структуры потоков и поля скоростей в ванне расплава

В качестве модели течения жидкости была выбрана модель, описываемая полными уравнениями Навье-Стокса [10]. Одним из способов линеаризации этой системы уравнений является допущение о несжимаемости жидкости. При этом получается система уравнений, которая в стационарном случае записывается относительно вектора скорости  $\vec{v}(x, y, z)$  и давления  $P(x, y, z)$ :

$$\eta \cdot \Delta \vec{v} + \vec{\nabla} P = 0; \quad (1)$$

$$(\vec{\nabla} \vec{v}) = 0. \quad (2)$$

На границе расчетной области задаются краевые условия первого рода  $\vec{v} = \vec{f}(x, y, z)$ , т. е. все компоненты скорости. На непроницаемых стенках области течения задаются условия не протекания и прилипания, которые сводятся к соотношению:

$$\vec{v}(x, y, z) = 0. \quad (3)$$

В случае протяженных и однородных вдоль оси симметрии (оси  $z$ ) структур задача сводится к двумерной. В подробной покомпонентной записи она имеет вид:

$$\vec{v}(x, y) = (v_x(x, y); v_y(x, y)); P = P(x, y). \quad (4)$$

Тогда уравнения (1) и (2) примут вид:

$$\begin{cases} \eta \cdot \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \eta \cdot \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \end{cases}$$

Граничные условия:

$$v_x(x, y) = v_{x_0}(x, y); v_y(x, y) = (x, y); (x, y) \in \Gamma, \quad (5)$$

где  $\Gamma$  – элемент границы.

Функции  $v_{x_0}(x, y)$  и  $v_{y_0}(x, y)$  являются заданными, причем сумма потоков, втекающего в любой элемент поверхности и вытекающего из него, равна нулю.

В случае рассмотренной осесимметричной задачи использована цилиндрическая система координат  $(r; z; \theta)$ .

Полагаем, что краевые условия также обладают осевой симметрией, т. е.:

$$\vec{v} = \vec{v}(r, z) = (v_r(r, z); v_z(r, z); v_\theta(r, z)). \quad (6)$$

При условии  $v_\theta(r, z) = 0$  из трехмерной системы Стокса получается замкнутая система уравнений относительно  $v_r(r, z)$  и  $v_z(r, z)$ . На границе изучаемой области задаются значения компонента скорости.

В рассматриваемом случае лазерного легирования поверхности движение жидкого металла в образующейся в поверхностном слое ванне инициируется растягивающим эффектом, возникающим в расплавленной пленке легирующей обложки. Вязкость жидкости

обеспечивает взаимодействие между соседними слоями расплава. Вследствие этого возникает коллективное движение в объеме – массоперенос.

Наличие тангенциальной к поверхности расплава силы моделировалось введением в поверхностный слой «растягивающего» элемента, физический смысл которого состоит в обеспечении течения вдоль поверхности. При практических расчетах необходимо задать некоторое значение радиальной составляющей скорости в поверхностном слое и краевые условия на поверхности ванны расплава (в случае включения в расплавленный металл твердых частиц).

Результатом работы программы является полная картина линий тока и распределения относительных значений скорости движущихся слоев во всем объеме.

Результаты исследований структуры потоков в стационарном режиме, как в случае однородной жидкости, так и при наличии твердых включений представлены на рис. 2 и 3. Система стрелок моделирует структуру потоков жидкого металла, а относительное распределение скоростей потоков в ванне расплава отображается пространственным распределением цветовых оттенков.

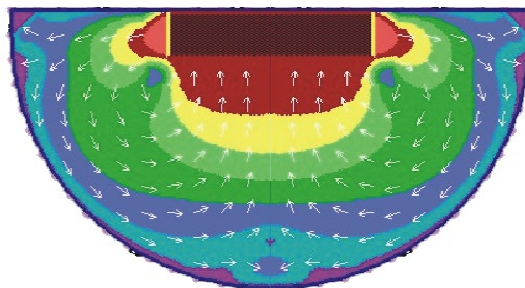


Рис. 2. Модель структуры конвективных потоков в зоне расплава

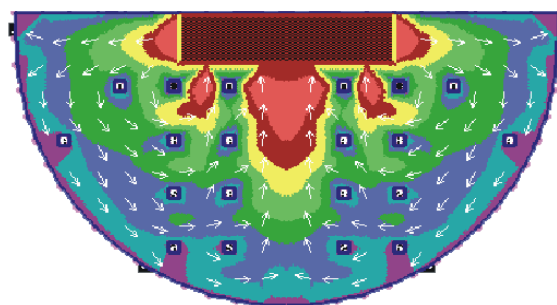


Рис. 3. Модель массопереноса при внедрении зону расплава твердых частиц легирующей обложки

### Экспериментальное исследование строения зон лазерного легирования.

Картины массопереноса, полученные методом физико-математического моделирования, согласуются с экспериментальными результатами металлографических исследований характера заполнения ванны расплава легирующими компонентами и их распределения в легированной зоне (рис. 4 и 5).

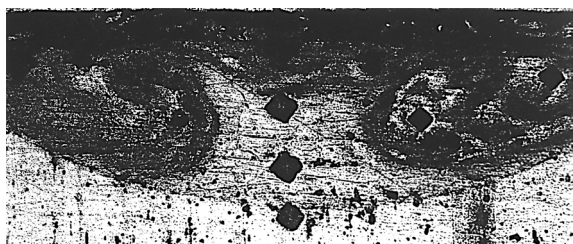
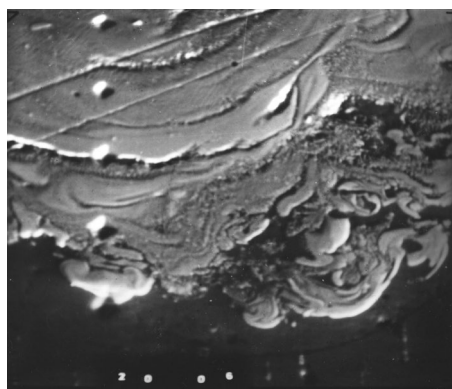


Рис. 4. Микроструктура алюминиевого сплава Д16 после лазерного легирования, иллюстрирующая конвективный характер массопереноса легирующего компонента в зоне расплава ( $\times 250$ )

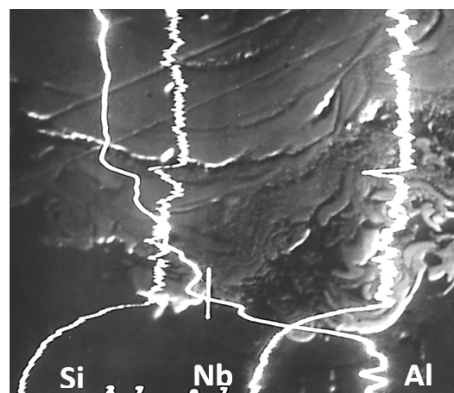


Рис. 5. Микроструктура алюминиевого сплава Д16 после лазерного легирования, иллюстрирующая заполнение зоны расплава легирующим компонентом по механизму внедрения конгломератов частиц обмазки ( $\times 250$ )

Объемное распределение легирующих компонентов в момент застывания расплава иллюстрирует рис. 6. В том случае, когда процесс массопереноса обусловлен внедрением твердых частиц легирующего вещества, их конгломераты выявляются в виде участков пониженной травимости (см. рис. 6, *a*). При этом изменение микротвердости по глубине упрочненной зоны имеет неравномерный характер с периодическими максимумами, соответствующими твердости частиц [11]. Концентрации Nb и Si за пределами зоны легирования резко снижаются, что видно из рис. 6, *б*.



*a*)



*б*)

Рис. 6. РЭМ-изображение сплава Д16 после насыщения дисилицидом ниобия (*a*) и кривые распределения элементов по толщине легированного слоя (*б*) ( $\times 600$ )

### Исследование антифрикционных свойств поверхностно легированных сплавов.

Антифрикционные свойства твердых тел определяются их силовым взаимодействием при относительном перемещении, что оценивается коэффициентом внешнего трения. Условием его возникновения является наличие положительного градиента механических свойств по глубине.

Испытания показали, что лазерное поверхностное легирование алюминиевых сплавов дисилицидом ниобия позволяет в 3 – 4 раза

снизить коэффициент трения поверхности и дает возможность варьирования его значения за счет регулирования коэффициента заполнения поверхности  $K_3$  и объемной доли конгломератов твердых частиц в зоне легирования, что соотносится с микротвердостью, как показателем упрочнения [12].

Проведено сопоставление временной зависимости коэффициента трения с величиной, усредненной по поверхности микротвердости Н100. Увеличение твердости поверхности соответствует уменьшению коэффициента трения,

что видно из рис. 7. Это согласуется с общепринятыми представлениями, интерпретирующими повышение твердости как увеличение эффективного значения модуля Юнга материала поверхностного слоя [13].

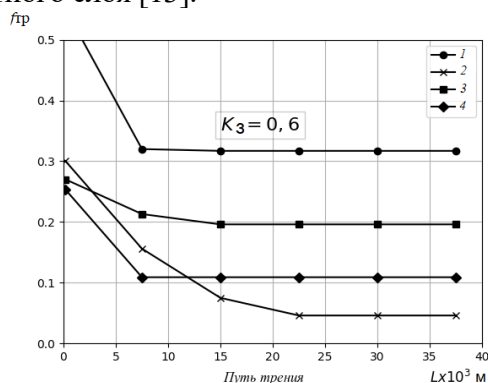


Рис. 7. Изменение коэффициента трения алюминиевого сплава Д16, легированного дисилицидом ниобия, в процессе испытаний без смазки для поверхностей с различной микротвердостью:

1 – Н100 = 1380 МПа (исходное состояние);  
2 – Н100 = 3600 МПа; 3 – Н100 = 4800 МПа;  
4 – Н100 = 5300 МПа

Известно, что применение смазочных материалов улучшает эксплуатационные свойства пар трения. Изменение коэффициента трения в период приработки в различных смазочных средах показано на рис. 8. Экспериментальные данные приведены для алюминиевого сплава Д16, легированного дисилицидом ниобия, при  $K_3 = 0,6$ . Наименьшие значения коэффициента трения получены при применении антифрикционной смазки ЦИАТИМ 201 (кривая 3) Ухудшение коэффициента трения при использовании масла КС-19 (кривая 1), а также жидкой смазки с присадками ПМС-100 (кривая 2), вероятнее всего связано с увеличением вязкости смазочных материалов.

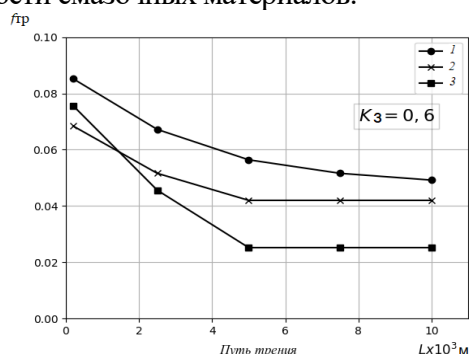


Рис. 8. Изменение коэффициента трения алюминиевого сплава Д16, легированного дисилицидом ниобия, в период приработки при испытаниях в различных смазочных средах:

1 – ПМС-100; 2 – компрессорное масло КС-19;  
3 – ЦИАТИМ-201

Сравнение рис. 7 и 8 показывает, что во всех случаях коэффициент трения без смазочного материала выше, чем при трении со смазкой. Увеличение изнашивания обусловлено адгезионным взаимодействием испытуемого образца и контртела. Так называемые мостики сварки, образующиеся между поверхностями контактирующих тел, непрерывно разрушаются (срезаются) как по месту их образования, так и на некоторой глубине, и формируются вновь. При наличии смазочного материала между контртелом и образцом формируется устойчивая трибопленка, которая значительно уменьшает адгезионное взаимодействие между трущимися поверхностями. Кроме того, трибопленка имеет меньшую вязкость по сравнению с вязкостью оксидных пленок, возникающих на поверхностях при сухом трении на воздухе. Как следствие, снижается износ упрочненных образцов.

### Заключение

Показано повышение антифрикционных свойств алюминиевых сплавов при лазерном поверхностном легировании путем целенаправленного создания в поверхностном слое гетерофазной структуры типа «твердые включения в мягкой матрице». ЛПЛ сплавов АЛ25 и Д16 дисилицидом ниобия позволяет в 3 – 4 раза снизить коэффициент трения поверхности, значения которого регулируются объемной долей частиц высокой твердости в зоне легирования, что определяет ее микротвердость, как показатель упрочнения.

Методом компьютерного моделирования процесса массопереноса в жидкой зоне лазерного воздействия проведен расчет конвективных потоков при наличии в ванне расплава твердых частиц, что позволяет прогнозировать механические свойства сплава в зоне поверхностного легирования при различных режимах лазерной обработки.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О. Исследование процессов лазерного легирования поверхности алюминиевых сплавов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3. 48 с.

2. Смирнова Н.А. Лазерное легирование поверхности алюминиевых сплавов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2014. № 3 (33). С. 28–36.

3. Мурзин С.П., Трегуб В.И., Трегуб Н.В., Никифоров А.М. Локальное легирование алюминиевых сплавов с применением лазерного воздействия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 6. С. 120–124.

4. Bernatsky A. V. Laser surface alloying of steel items (Review). The Paton Welding Journal. 2013. no. 12. pp. 2–8.

5. Чудина О.В. Модифицирование стальной поверхности с использованием лазерного нагрева // Сварочное производство. 2016. № 3. С. 24–28.

6. Петрова Л.Г., Александров В.Д., Морщилов М.В. Получение износостойких покрытий на сплавах алюминия методом лазерного легирования // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 9 (123). С. 42–48.

7. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения). КРАСАНД. 2012. 512 с.

8. Александров В.Д., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Морщилов М.В. Системный подход к проблеме поверхностного упрочения алюминиевых сплавов лазерной обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 5 (131). С. 11–19.

9. Белашова И.С., Тарасова Т.В. Исследование кинетики массопереноса при лазерном легировании. // Научно-технические технологии. 2007. Т. 8. № 12. С. 57–62.

10. Авдудевский В.С. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса. М.: Наука, 1987. 258 с.

11. Александров В.Д., Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Поверхностное легирование алюминиевых сплавов с использованием лазерного нагрева // СТН. № 7. 2017. С. 23–26

12. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий. М.: Машиностроение, 2003. 380 с.

## REFERENCES

1. Tarasova T.V., Gvozdeva G.O. Investigation of the processes of laser doping of aluminum alloy surfaces/ Science and Education: Scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University, 2012, no. 3, 48 p.

2. Smirnova N.A. Laser surface alloying of aluminum alloys / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2014, no. 3 (33), pp. 28–36.

3. Murzin S.P., Tregub V.I., Tregub N.V., Nikiforov A.M. Point alloying of aluminum alloys using laser altering/ Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2012, vol. 14, no. 6, pp. 120–124.

4. Bernatsky A. V. Laser surface alloying of steel items (Review). The Paton Welding Journal. 2013. no. 12. pp. 2–8.

5. Chudina O.V. Modification of a steel surface using laser heating. Welding production, 2016, no. 3, pp. 24–28.

6. Petrova L.G., Alexandrov V.D., Morchilov M.V. Formation of wear resistant coatings on aluminum alloys using laser doping technique / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2021, no. 9 (123), pp. 42–48.

7. Khrushchev M.M. Friction, wear and microhardness of materials: Selected works (to the 120th anniversary), KRASAND Publ., 2012, 512 p.

8. Alexandrov V.D., Petrova L.G., Belashova I.S., Wrinkilov M.V. A systematic approach to the problem of face hardening of aluminum alloys by industrial laser machining / Science intensive technologies, 2022, no. 5 (131), pp. 11–19.

9. Belashova I.S., Tarasova T.V. Studies on mass transfer kinetics in laser doping. // Science intensive technologies. 2007, vol. 8, no. 12, pp. 57–62.

10. Avdudovsky, V.S. Mathematical modeling of convective heat and mass transfer based on the Navier-Stokes equations. Moscow: Nauka, 1987, 258 p.

11. Alexandrov V.D., Petrova L.G., Sergeeva A.S. Surface alloying of aluminum alloys using laser heating / STN. no. 7, 2017, pp. 23–26.

12. Prikhod'ko V.M., Petrova L.G., Chudina O.V. Metallophysical basis for reinforcing technologies development, Moscow: Mashinostroenie, 2003, 380 p.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.02.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 17.03.2023

The article was submitted 22.02.2023; approved after reviewing 13.03.2023; accepted for publication 17.03.2023