

УДК 621.785.54

DOI:10.30987/2223-4608-2021-9-42-48

**Л.Г. Петрова, д.т.н.,
В.Д. Александров, д.т.н.,
М.В. Морщилов, к.т.н.**

*(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, Россия, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)*

E-mail: petrova_madi@mail.ru

Получение износостойких покрытий на сплавах алюминия методом лазерного легирования*

Рассмотрен способ улучшения свойств алюминиевых сплавов лазерным поверхностным легированием. Проведен оптимальный подбор легирующих элементов. Показано, что данный способ упрочнения повышает износостойкость и снижает коэффициент трения упрочняемой поверхности.

Ключевые слова: лазерное легирование; легирование; алюминиевые сплавы; износостойкие покрытия; легированный слой.

**L.G. Petrova, Dr. Sc. Tech.,
V.D. Aleksandrov, Dr. Sc. Tech.,
M.V. Morshchilov, Can. Sc. Tech.**

*(Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
64, Leningradskiy Pr., Moscow, Russia, 125319)*

Getting wear-resistant coatings on aluminum alloys by laser alloying

A method to improve the properties of aluminum alloys by laser surface alloying is considered. The optimal selection of alloying elements is carried out. It is shown that this method of hardening increases the wear resistance and reduces the friction ratio of the hardened surface.

Keywords: laser alloying; alloying; aluminum alloys; wear-resistant coatings; doped layer.

Введение

В современном машиностроении алюминиевые сплавы все чаще используются как антифрикционные [1]. При введении в алюминиевые антифрикционные сплавы олова (Sn), свинца (Pb), кадмия (Cd) образуются струк-

турные составляющие с низкой твердостью, вследствие чего повышаются противозадирные свойства и снижается коэффициент трения сплавов. Трудности введения свинца в алюминиевые сплавы вызваны тем, что в жидком состоянии растворимость свинца составляет всего 1% при температуре 700 °С, и только при значительном перегреве она возрастает и достигает 30% при температуре 1200 °С.

Приработка контактирующих поверхностей сталей и сплавов ускоряется применением ан-

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

триффрикционных и противозадирных покрытий. В настоящее время существуют разные способы нанесения на поверхность износостойких покрытий. Наибольшее распространение получили химические; электрохимические; гальванические; плазменные и другие методы [2 – 3]. Электрохимическим способом осаждают чистые металлы и многокомпонентные сплавы. Этот способ имеет ряд существенных недостатков, в частности, низкую твердость, что сдерживает его применение для алюминиевых сплавов.

Лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ) эффективно применяется для поверхностного упрочнения как сталей, так и сплавов цветных металлов. Высокие температуры нагрева и скорости охлаждения обуславливают специфику строения зон лазерного легирования [4 – 6].

В предыдущих исследованиях показана эффективность лазерного упрочнения алюминиевых сплавов для повышения их характеристик при работе в условиях трения [7]. В данной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование ЛПЛ алюминиевых сплавов при насыщении металлами и химическими соединениями.

Методика проведения исследований

Лазерное легирование алюминиевых сплавов АЛ25 и Д16 осуществляли на установках Квант-16 (импульсного действия) и Комета-1 (непрерывного действия). Режимы лазерного излучения предусматривали проплавление зоны воздействия.

Для легирования использовали как чистые металлы, так и химические соединения, представленные в табл. 1. Сравнение насыщающих компонентов проводили по микротвердости зоны легирования (HV_{max} , МПа), по толщине зоны проплавления (y , мкм) и по степени заполнения ванны расплава (коэффициент заполнения – K_3).

Введение в зону легирования порошка насыщающего компонента (дисперсностью 5...15 мкм) осуществляли путем нанесения обмазок. Толщина обмазки ($\delta = 0,1 \dots 0,3$ мм) и плотность мощности излучения q , Вт/см², являются основными входными параметрами регулирования строения зоны легирования.

Рентгеноструктурный анализ фазового состава легированных слоев проводили на дифрактометре ДРОН-3 в излучении $CoK\alpha$.

Испытания образцов на износ проводили на машине 77МТ-1 в режиме возвратно-

поступательного движения при трении образца о контртело (пластина из закаленной стали 40Х). Скорость движения образца – 0,15 м/с; длина прохода – 70 мм; суммарный путь трения – 1600 м. Определяли весовой показатель износа (потери массы образцов ΔP) при разном времени испытаний.

1. Элементы и химические соединения, используемые при лазерном легировании алюминиевых сплавов

Насыщающие компоненты	HV_{max} , МПа	y , мкм	K_3
Металлы			
Mo	10500	490	0,2
Ni	5230	410	0,9
Ti	6800	520	0,55
Cr	6200	330	1,0
W	10200	280	0,3
Cu	2820	380	0,65
Химические соединения			
WC	10400	185	0,3
NbC	8240	325	0,2
TaSi ₂	9300	470	0,35
NbSi ₂	6650	380	0,85

Коэффициенты трения определяли при испытаниях на износ на машине ХТИ-85. Испытания проводили при трении без смазки диска из закаленной стали 45 со скоростью вращения 1500 об/мин.

Результаты исследования

Выбор насыщающих компонентов для поверхностного легирования. Насыщающие компоненты для сплавов алюминия выбраны, исходя из потенциальной возможности повышения твердости легированных слоев до уровня закаленной стали.

В табл. 1 указаны металлы и химические соединения, которые образуют в алюминиевых сплавах слои с требуемой микротвердостью. Однако характер заполнения зоны расплава при легировании разными компонентами существенно отличается (рис. 1).

Наилучшие показатели заполнения ванны расплав достигаются при насыщении алюминия Cr, Ni и NbSi₂. Насыщение хромом и никелем позволяет получить однородную структуру зоны легирования, а легирование дисилицидом ниобия формирует гетерофазную структуру слоя, что благоприятно для улучшения антифрикционных свойств.

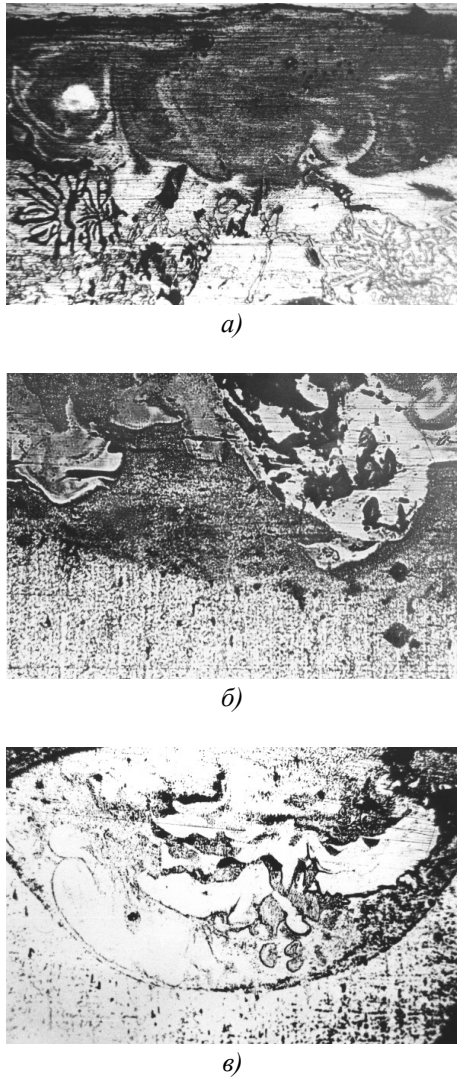


Рис. 1. Микроструктуры зон легирования после насыщения (x200):

а – сплава АЛ25 медью; б – сплава АЛ25 вольфрамом; в – сплава Д16 дисилицидом ниобия

Механизмы образования гетерофазной структуры в зоне ЛПД. При легировании металла в условиях лазерного нагрева с расплавлением происходит массоперенос в жидкой фазе [8]. При этом реализуется конвективное перемешивание расплава, а также возможно внедрение в жидкую ванну твердых частиц.

Степень однородности заполнения зоны легирования определяется особенностями процесса массопереноса и в большинстве случаев при легировании из обмазок это влияние является комплексным. Наличие градиентов концентрации и температуры служит причиной возникновения диффузии. Однако диффузионный механизм насыщения не является основным. Количественные оценки глубины диффузионного насыщения, выполненные на основе решения уравнения диффузии, дают в

несколько раз меньшую величину по сравнению с результатами эксперимента. Определяющую роль при легировании играет конвекция (рис. 2).

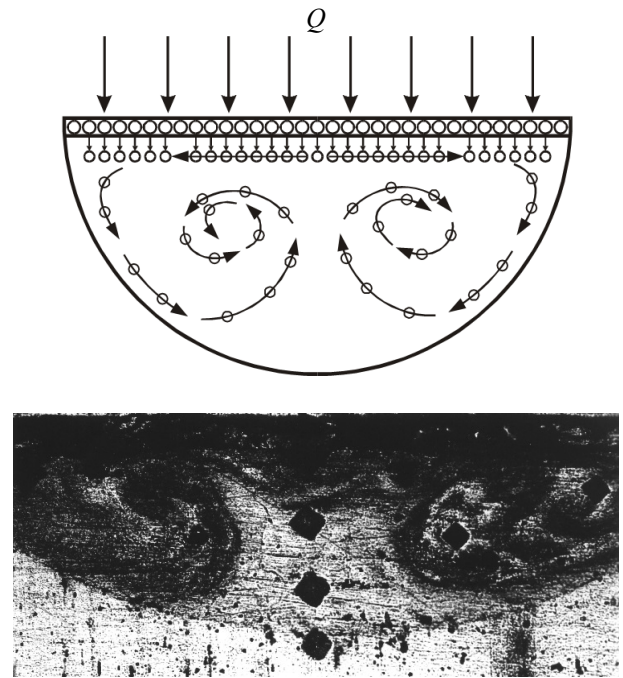


Рис. 2. Схема конвективного массопереноса в зоне лазерного легирования (x200)

Для количественной оценки конвективных потоков произведено решение системы уравнений движения (уравнения Навье-Стокса), уравнения непрерывности и уравнения теплопроводности при заданных начальных и граничных условиях.

Представленная модель предусматривает управление распределением легирующего элемента в зоне расплава для оптимизации характеристик легированного слоя. Модель построена в предположении, что основная временная фаза насыщения соответствует стационарной стадии массопереноса:

$$(\vec{v}\nabla\vec{T}) = \chi\Delta T + \frac{1}{\rho\cdot C_p} Q(r), \quad (1)$$

$$(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu\Delta\vec{v}, \quad (2)$$

$$\text{div}\vec{v} = 0, \quad (3)$$

где \vec{v} – вектор скорости; χ – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость; $Q(r)$ – плотность мощности; ∇ – оператор градиента; ∇P – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости.

Аналитическое решение задачи движения расплава в пограничном слое с учетом градиента температуры при граничных условиях $v_x = v_y = 0$ при $y = 0$ дает следующие выражения:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

При решении было сделано физически обоснованное допущение, которое состоит в том, что проекция скорости движения жидкости на касательную к границе раздела, т.е. на ось X , изменяется в поперечном к оси направлении существенно быстрее, чем вдоль самой границы раздела. В силу этого в уравнениях Навье-Стокса и теплопроводности были отброшены вторые производные от компоненты скорости по оси X .

Были получены числовые решения системы уравнений движения при различных начальных условиях и разных значениях параметров материала подложки и обмазки (плотность; теплопроводность; температуры плавления и

кипения; вязкость). Показано, что для каждой пары материалов подложки и легирующей обмазки путем варьирования плотности мощности лазерного излучения можно определить условия наиболее эффективного заполнения элементом ванны расплава.

Структура и фазовый состав легирующего слоя. Диаграммы влияния плотности мощности лазерного излучения и толщины обмазки на фазовый состав и микротвердость зон лазерного легирования в алюминиевых сплавах приведены на рис. 3. Наибольшей микротвердости отвечают области режимов, формирующих в твердом растворе наибольшее число интерметаллидных фаз.

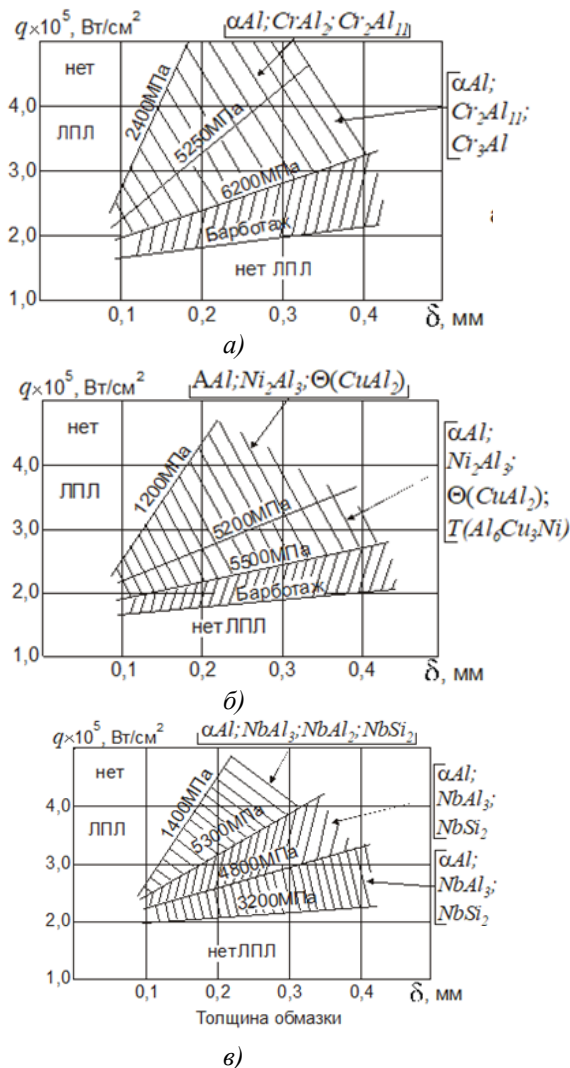


Рис. 3. Диаграммы влияния параметров лазерного воздействия на фазовый состав и зон легирования: а – сплава АЛ25 хромом; б – сплава Д16 никелем; в – сплава Д16 дисилицидом ниобия

Изучение микроструктур зон легирования показало, что размеры, форма и ориентировка структурных элементов при насыщении Cr, Ni и NbSi₂ различаются (рис. 4).

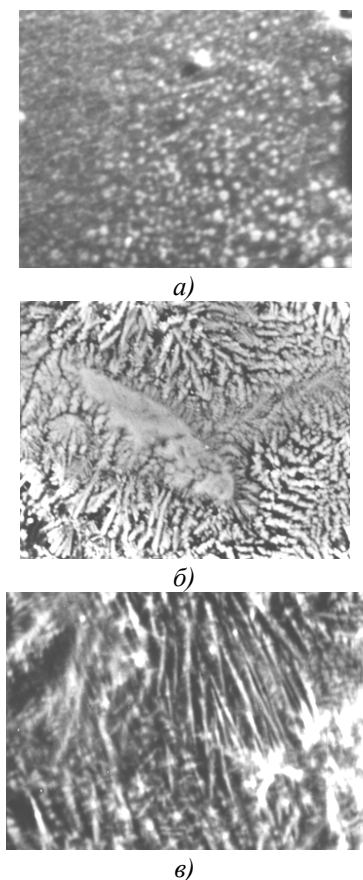


Рис. 4. Микроструктуры зон лазерного легирования алюминиевых сплавов после насыщения ($\times 2000$):

a – хромом; *б* – никелем; *в* – силицидом ниобия

При легировании алюминиевых сплавов хромом распределение микротвердости по толщине зоны легирования практически постоянно. Это свидетельствует об однородности структуры, что подтверждается анализом микроструктуры (см. рис. 4, *a*). В зоне легирования наблюдаются сферические выделения с достаточно высокой объемной долей, которые идентифицированы как интерметаллидные фазы Cr_nAl_m. Такая структура обеспечивает изотропность свойств и низкую вероятность создания внутренних напряжений в области лазерного воздействия.

В зоне легирования никелем наблюдаются участки с различной травимостью (см. рис. 4, *б*), что указывает на менее равномерное распределение легирующего элемента: в микроструктуре сплавов наблюдаются кораллоподобные кристаллы.

В слоях, легированных силицидом ниобия, формируются две фазы (см. рис. 1, *в*): слабо

травящаяся светлая фаза с высокой микротвердостью (~6500 МПа) и фаза с микротвердостью 4000...4500 МПа. В зонах с максимальной микротвердостью располагаются скопления частиц легирующего компонента (см. рис. 4, *в*).

Анализ полученных результатов позволяет выявить причины увеличения твердости легированных лазером зон в алюминиевых сплавах. Основными факторами упрочнения являются формирование мелкозернистой структуры за счет высокой скорости охлаждения (зернограничный механизм); образование пересыщенных твердых растворов; выделение упрочняющих интерметаллидных фаз (дисперсионное упрочнение).

Износостойкость поверхностно легированных алюминиевых сплавов. В определенной степени показатели микротвердости слоя и ее распределение коррелируют с сопротивлением поверхности изнашиванию.

На рис. 5 показаны изменения весового показателя износа от времени испытаний алюминиевого сплава после лазерного легирования исследуемыми компонентами в сопоставлении с показателями износа сплава в исходном состоянии.

Испытания показали, что создание упрочненных зон лазерного легирования существенно повышает износостойкость сплавов. В наибольшей степени происходит повышение стойкости к изнашиванию у образцов легированных хромом, что коррелирует с показателями микротвердости.

На показатель износа оказывает влияние степень заполнения зоны легирования насыщенным компонентом. При малых коэффициентах заполнения ($K_3 = 0,3$) износостойкость наименее высока (см. рис. 5, *a*): образуется большое количество продуктов изнашивания. Поскольку алюминиевая подложка обладает большей пластичностью, чем упрочненная зона, то на микроуровне происходит «схватывание» между поверхностями материала контртела и неупрочненных участков подложки.

Увеличение степени заполнения зоны легирования способствует повышению износостойкости поверхностно легированного сплава (см. рис. 5, *б*, *в*). Это объясняется тем, что площадь упрочненной поверхности с пониженной относительно подложки пластичностью увеличивается. Процесс «схватывания» между контактирующими телами начинается при более высоких нагрузках. Наибольшая износостойкость соответствует заполнению

упрочненной зоны при $K_3 = 0,6$ (рис. 6), дальнейшее увеличение степени заполнения (до $K_3 = 1,0$) не оказывает положительного влияния. Поэтому показатель $K_3 = 0,6$ для алюми-

ниевого сплава АЛ25 следует признать оптимальным для сопротивления износу при средней удельной нагрузке ($P_{уд} = 2$ МПа).

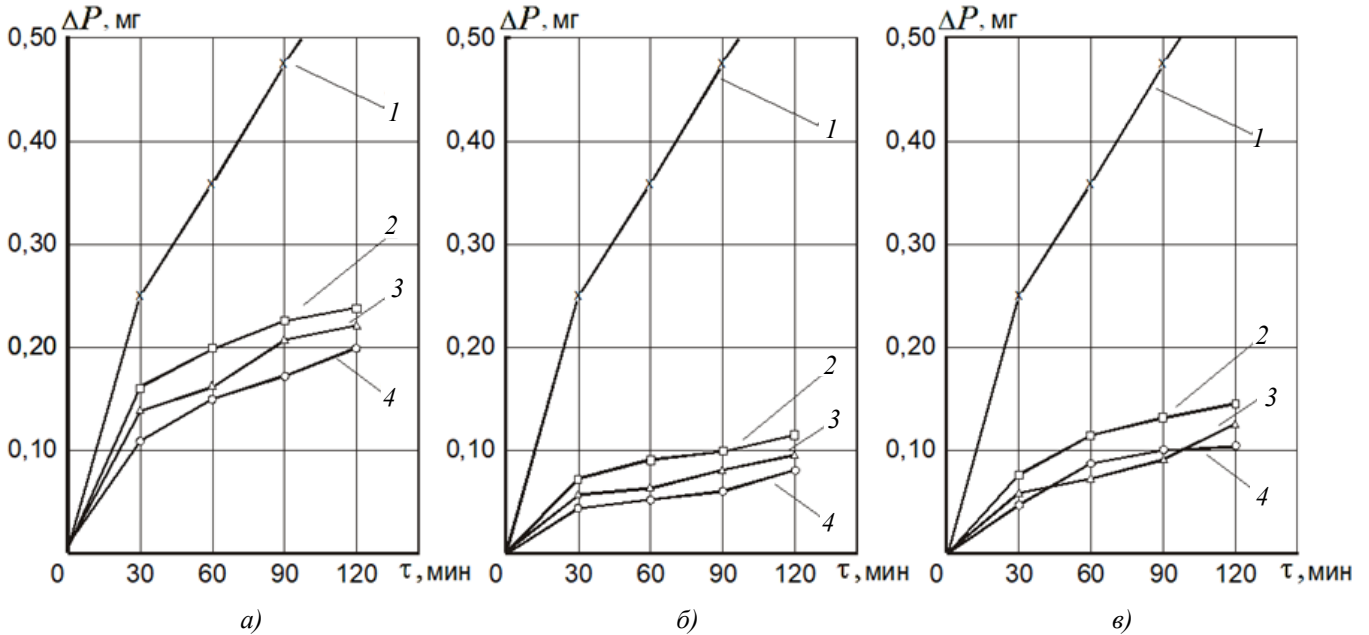


Рис. 5. Временные диаграммы весового показателя износа сплава АЛ25 в исходном состоянии (1) и после лазерного легирования ($W = 1,0$ кВт, $\delta = 0,3$ мм) никелем (2), дисилицидом ниобия (3) и хромом (4) при различной степени заполнения элементом упрочненной зоны: а – $K_3 = 0,3$; б – $K_3 = 0,6$; в – $K_3 = 1,0$

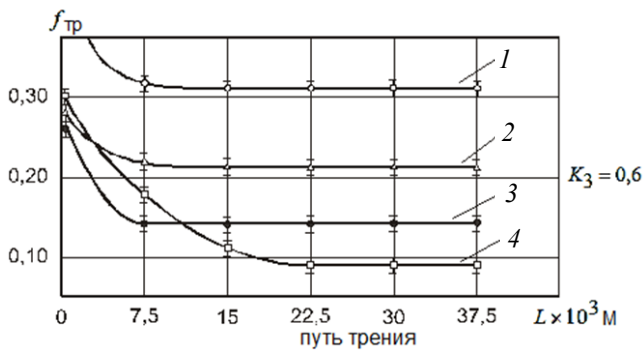


Рис. 6. Коэффициенты трения исходного сплава АЛ25 (1) и сплава, легированного никелем (2), хромом (3), дисилицидом ниобия (4) при коэффициенте заполнения $K_3 = 0,6$

Для данного режима характерно также снижение коэффициентов трения легированных образцов. Наименьшие коэффициенты трения на стадии стационарного износа показали образцы, легированные дисилицидом ниобия: по сравнению с неупрочненным образцом снижение $f_{тр}$ происходит почти в 4 раза, при этом удлиняется стадия приработки. Легирование хромом снижает коэффициент трения более чем в 2 раза, никелем – почти в 1,5 раза.

Выводы

1. Антифрикционные свойства алюминиевых сплавов АЛ25 и Д16 можно улучшить ЛПЛ путем создания в поверхностном слое гетерогенной структуры типа «твердые включения в мягкой матрице».

2. Анализ элементов для поверхностного легирования алюминиевых сплавов показал, что максимальное упрочнение в сочетании с эффективным заполнением зоны легирования насыщающим компонентом обеспечивают хром и никель, а также дисилицид ниобия.

3. Показано, что упрочнение при ЛПЛ обусловлено формированием мелкозернистой структуры, выделением упрочняющих интерметаллидных фаз, образованием пересыщенных твердых растворов (в случае Cr и Ni), и наличием нерастворенных частиц $NbSi_2$ в случае легирования дисилицидом ниобия.

4. Установлено, что лазерное легирование указанными компонентами, повышает износостойкость алюминиевых сплавов и снижает (в 1,5 – 4 раза) коэффициент трения упрочненной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов, А.Е., Гершман, И.С., Гершман, Е.И., Захаров, С.М., Подрабинник, П.А. Алюминиевые литейные антифрикционные сплавы с повышенной спо-собностью к приспособляемости поверхностей трения // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – Т. 76. – №6. – С. 336-340.
2. Петрова, Л.Г., Александров, В.Д., Моршилов, М.В. Формирование износостойких покрытий на алюминиевом сплаве АЛ9 гальваническими, детонационными и газозависимыми методами // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №1 (79). – С. 22-27.
3. Александров, В.А., Петрова, Л.Г., Сергеева, А.С., Александров, В.Д., Ахметжанова, Э.У. Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте // СТН. – 2019. – №3. – С. 13-16.
4. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюрин, А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
5. Чудина, О.В., Брежнев, А.А. Поверхностное легирование углеродистых сталей при лазерном нагреве // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №4 (64). – С. 10-16.
6. Варич, Н.И., Колесников, К.Е. Влияние большой скорости охлаждения на структуру и свойства алюминиевых сплавов // Изв. Вуз. Цветная металлургия. – 1960. – №4. – С. 131-133.
7. Александров, В.Д., Петрова, Л.Г., Моршилов, М.В., Сергеева, А.С. Лазерное легирование поверхностных слоев алюминиевых сплавов с целью повышения их износостойкости // Технология металлов. – 2019. – №10. – С. 33-39.
8. Белашова, И.С., Тарасова, Т.В. Исследование кинетики массопереноса при лазерном легировании // Научные технологии. – 2007. – Т. 8. – №12. – С. 57-62.

REFERENCES

1. Mironov, A.E., Gershman, I.S., Gershman, E.I., Zakharov, S.M., Podrabinnik, P.A. Aluminum Casting Antifriction Alloys with Increased Capacity to Adaptability of Friction Surfaces // Bulletin VNIIZHT. – 2017. – vol.76. – no.6. – PP. 336-340.
2. Petrova, L.G., Aleksandrov, V.D., Morshchilov, M.D. Wear-resistant Coating Formation on Alluminium Alloy AL9 through Galvanic, Denotation and Gas-cycle Methods // Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. – 2018. – no.1(79). – PP. 22-27.
3. Aleksandrov, V.A., Petrova, L.G., Sergeeva, A.S., Aleksandrov, V.D., Akhmedzhanova, E.U. Combined Plasma Methods of Chemical and Thermal Treatment to Form Modified Coatings on the Tool // STN. – 2019. – no.3. – PP. 13-16.
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. Technological Processes of Laser Treatment. – Moscow: Bauman University, 2006. – 664 p.
5. Chudina, O.V., Brezhnev, A.A. Surface Alloying of Carbon Steels by Laser Heating // Strengthening Technologies and Coatings. – 2010. – no.4 (64). – PP. 10-16.
6. Varich, N.I., Kolesnikov, K.E. The Impact of High Cooling Rate on the Structure and Properties of Aluminum Alloys // Izd. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya. – 1960. – no.4. – PP.131-133.
7. Aleksandrov, V.D., Petrova, L.G., Morshchilov, M.D., Sergeeva, A.S. Laser Alloying of Surface Layers of Aluminium Alloys to Increase their Wear Resistance // Tekhnologiya Metallov. – 2019. – no.10. – PP. 33-39.
8. Belashova, I.S., Tarasova, T.V. Investigation of Mass Transfer Kinetics in Laser Alloying // Science Intensive Technologies. – 2007. – vol. 8. – no.12 – PP. 57-62.

Рецензент д.т.н.

Ирина Станиславовна Белашова

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-910-293-62-96.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 16.09.2021. Выход в свет 30.09.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

