

Модифицирование поверхности, в том числе пучками
заряженных частиц, потоками фотонов и плазмы
Modification of Surface Including Charged Particle Beams
and Photon and Plasma Fluxes

УДК 621.785.4

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-53-60>

Научная статья

Research article

Формирование керамического покрытия
на поверхности алюминиевого сплава ВАЛ10
при лазерном модифицировании
в растворе полисиликатовД. Г. Калюжный^{1, 2}, М. В. Палабугин¹, И. Н. Бурнышев²,
В. Ф. Лыс², В. И. Ладьянов²¹ Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова
Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия, 426067, г. Ижевск, ул. Татьяны Барамзиной, 34 dikdik@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования физико-механических свойств поверхностного слоя алюминиевого сплава ВАЛ10 после лазерного импульсного воздействия на структуру материала, проводимого в ванне с водным раствором полисиликатов (ПС) различной концентрации. Покрытия формировались на образцах размером 10×10×3 мм. Лазерная обработка образцов алюминиевого сплава была произведена с использованием Nd:YAG-лазера. Показано, что качество формируемой поверхности и ее свойства могут меняться в зависимости от параметров лазерного воздействия, а также концентрации раствора полисиликатов и технологии процесса обработки в целом. Рассеяние излучения слоем раствора ПС приводит к существенному снижению шероховатости поверхности. Для образцов, обработанных на воздухе, размеры кратеров на поверхности составили более 400 мкм, а для образцов, обработанных в растворе ПС, они не превышали 100 мкм. Проведен сравнительный анализ влияния концентрации раствора на элементный состав. Исследованы фрикционные характеристики и измерена микротвердость модифицированной поверхности. Установлено, что в результате обработки протекают процессы упрочнения поверхности, связанные с заполнением углублений высокопрочными оксидами. Это позволило получить в поверхностном слое образцов смесь, содержащую карбид кремния и оксид алюминия. Проведены исследования износа модифицированной поверхности в трибосопряжении «шарик – образец». Для образцов, подвергнутых лазерному воздействию в растворе ПС, характерны повышение износостойкости (величина износа уменьшилась на 40 %) и снижение коэффициента трения на 30 %, также установлено увеличение микротвердости.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, лазерное модифицирование, полисиликаты (ПС), керамическое покрытие, структура поверхности, микротвердость

Для цитирования: Калюжный Д.Г., Палабугин М.В., Бурнышев И.Н., Лыс В.Ф., Ладьянов В.И. Формирование керамического покрытия на поверхности алюминиевого сплава ВАЛ10 при лазерном модифицировании в растворе полисиликатов. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024;18(2):53–60.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-53-60>

Formation of ceramic coating on VAL10 aluminum alloy surface via laser modification in polysilicate solution

D. G. Kalyuzhnyi^{1, 2}, M. V. Palabugin¹, I. N. Burnyshev²,
V. F. Lys², V. I. Ladyanov²

¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University

7 Studencheskaya Str., Izhevsk 426069, Russia

² Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences

34 Tatyany Baramzinoi Str., Izhevsk 426067, Russia

✉ dikdik@mail.ru

Abstract. This article presents the results of an experimental study on the physical and mechanical properties of the surface layer of the VAL10 aluminum alloy after pulsed laser treatment, conducted in a bath with an aqueous solution of polysilicates (PS) at various concentrations. Ceramic coatings were produced on specimens measuring 10×10×3 mm. The laser processing of aluminum alloy specimens was carried out using an Nd:YAG laser. The study demonstrates that the quality of the resulting surface and its properties can vary depending on the laser exposure parameters, the concentration of the polysilicate solution, and the overall processing technique. The scattering of radiation by the PS solution layer leads to a significant reduction in surface roughness. In specimens processed in ambient air, the crater sizes on the surface exceeded 400 μm, while for specimens processed in a PS solution, they did not exceed 100 μm. A comparative analysis of the impact of solution concentration on elemental composition was performed. The study also included an investigation of friction characteristics and the measurement of microhardness of the modified surface. The research revealed that surface hardening processes occur as a result of the treatment, associated with the filling of recesses with high-strength oxides. This enabled the creation of a mixture containing silicon carbide and aluminum oxide in the surface layer of the specimens. Furthermore, wear tests of the modified surface were conducted using a “ball–specimen” tribological coupling. Specimens subjected to laser irradiation in a PS solution demonstrated increased wear resistance (a 40 % reduction in wear) and a 30 % decrease in the friction coefficient. Additionally, an increase in microhardness was observed.

Keywords: aluminum alloy, laser modification, polysilicates (PS), ceramic coating, surface structure, microhardness

For citation: Kalyuzhnyi D.G., Palabugin M.V., Burnyshev I.N., Lys V.F., Ladyanov V.I. Formation of ceramic coating on VAL10 aluminum alloy surface via laser modification in polysilicate solution. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(2): 53–60. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-2-53-60>

Введение

В современном машиностроении курс, взятый на уменьшение массы конечных изделий при неизменно высоком уровне эксплуатационных свойств (прочность, износостойкость и пр.), а также на достижение высокой степени автоматизации процесса, является одним из важнейших [1–3]. В данном контексте упрочнение поверхности алюминиевых сплавов, к достоинствам которых относятся низкая плотность и высокая удельная прочность, имеет большие перспективы [4–9]. В то же время низкие показатели твердости являются существенными недостатками этих материалов [10; 11]. Упрочнение поверхностного слоя позволяет повысить износостойкость детали в целом.

В настоящее время существуют различные методы упрочнения поверхности металлов и сплавов [12]. Наряду с использованием термических и химико-термических процессов, напыления и дробеструйной обработки применяются методы формирования свойств поверхности с помощью лазерного

воздействия [13]. Современные лазерные установки характеризуются высокой скоростью обработки, локальностью, возможностью широкого регулирования параметров энергии и длительности воздействия в зоне обработки [14].

Технологии лазерной модификации поверхности алюминиевых сплавов, и в частности лазерное легирование, относятся к передовым в сфере повышения стойкости алюминиевых сплавов к коррозии, механическим воздействиям, а также адгезионному и абразивному изнашиванию [15]. На данный момент одним из перспективных методов по созданию защитных покрытий на сплавах алюминия является сплавление лазерным излучением легирующих порошков с подложкой [16]. В качестве легирующих компонентов используют как металлы (Ni, Cr и др.), так и неметаллы (B, Si). Предварительно в состав порошка вводят связующий элемент [17]. Получившуюся массу равномерно наносят на подложку, после чего поверхность обрабатывается лазером [18; 19]. Из-за разницы температур плавления элементов, входящих в состав обмазки и подложки из

алюминиевого сплава, перечень компонентов, пригодных к внедрению в состав поверхности алюминиевого образца, сильно ограничен и должен быть сопоставим с температурой плавления алюминия [20]. Использование других составляющих зачастую ведет к существенному снижению качества создаваемого покрытия [21]. Разновидностью описанной технологии можно считать подачу легирующих элементов из жидкой фазы. В этом случае деталь помещается в технологический раствор, и лазерное излучение, образуя парогазовый канал в жидкости, доставляется по нему к поверхности детали.

В последнее время находят применение металлокерамические композитные материалы с матрицей на основе алюминия, упрочненной тугоплавкими керамическими частицами карбида кремния (SiC) [22]. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей отличаются высокой удельной прочностью в сочетании с малой плотностью. Легирование частицами карбида кремния позволяет получить материал с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью [23].

Цель данной работы заключалась в исследовании специфики изменения механических свойств керамических покрытий на подложке из алюминиевого сплава ВАЛ10, полученных при воздействии лазерного излучения в ванне с водным раствором полисиликата (ПС), а также в определении параметров обработки, при которых возможно повысить микротвердость поверхностного слоя и его стойкость к истиранию.

Методика исследований и полученные результаты

Наиболее часто среди неметаллических легирующих компонентов для алюминиевых сплавов используется кремний. Легирование кремнием позволяет получать заэвтектическую структуру на поверхности доэвтектических сплавов с одновременным повышением твердости поверхности. В данной работе формирование покрытий осуществлялось на образцах алюминиевого сплава ВАЛ10, размеры которых составляли 10×10×3 мм. Для лазерной обработки их поверхности был использован твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1,06 мкм в составе установки лазерной сварки ЛИС-25 (ООО ЭИКТЛ «Лаген», Россия). Максимальная энергия в импульсе составляла 25 Дж, длительность импульса – 5 мс, частота следования импульсов – 3 Гц. Во время обработки образец помещался в ванну с водным раствором полисиликата $(\text{Na}_2\text{O})_n \cdot (\text{SiO}_2)_m$. Концентрация последнего была определена экспериментально и составила 10–15 %. Увеличение концентрации ПС привело к выделению газовых пузы-

рей из среды, что существенно снижало эффективность доставки лазерного излучения к поверхности образца, и к сильному разбрызгиванию раствора ПС. С другой стороны, при меньшей его концентрации содержание кремния в покрытии заметно падало (рис. 1).

Толщина слоя жидкой среды над поверхностью обрабатываемого образца поддерживалась на уровне 1 мм. Были также изготовлены контрольные образцы, обработанные на воздухе и в дистиллированной воде. В результате рассеяния излучения слоем раствора ПС, находящимся над поверхностью образца, существенно снижалась величина неровностей на поверхности.

Так, для образцов, обработанных на воздухе, размер кратеров на поверхности составлял более 400 мкм, а в случае применения раствора ПС следы воздействия не превышали диаметра 100 мкм (рис. 2).

Созданный лазерной обработкой слой на поверхности металла позволяет повысить долговечность детали и ее работоспособность. Лазерная обработка алюминиевого сплава вызывает перераспределение химических элементов по глубине. Кратеры, образующиеся на поверхности, заполняются соединениями кремния и алюминия. Исследование химического состава образцов проводилось на оже-анализаторе JAMP-10 S (JEOL, Япония). По форме оже-линий был сделан вывод, что алюминий находится в окисленном состоянии, а углерод и кремний – в карбидном (рис. 3).

Размер углублений на поверхности детали и их взаимное расположение обусловлены режимом обработки и концентрацией раствора ПС. Отсутствие перекрытия кратеров не позволяет заполнить всю площадь поверхности, что приводит к разрывам в керамическом слое. На необработанных участках остается выход на поверхность основного

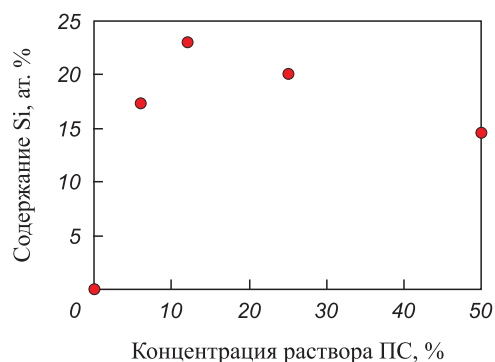


Рис. 1. Содержание кремния в покрытии на глубине 3 нм в зависимости от концентрации раствора полисиликата

Fig. 1. Relationship between the silicon content in the coating at a depth of 3 nm and the concentration of the polysilicate solution

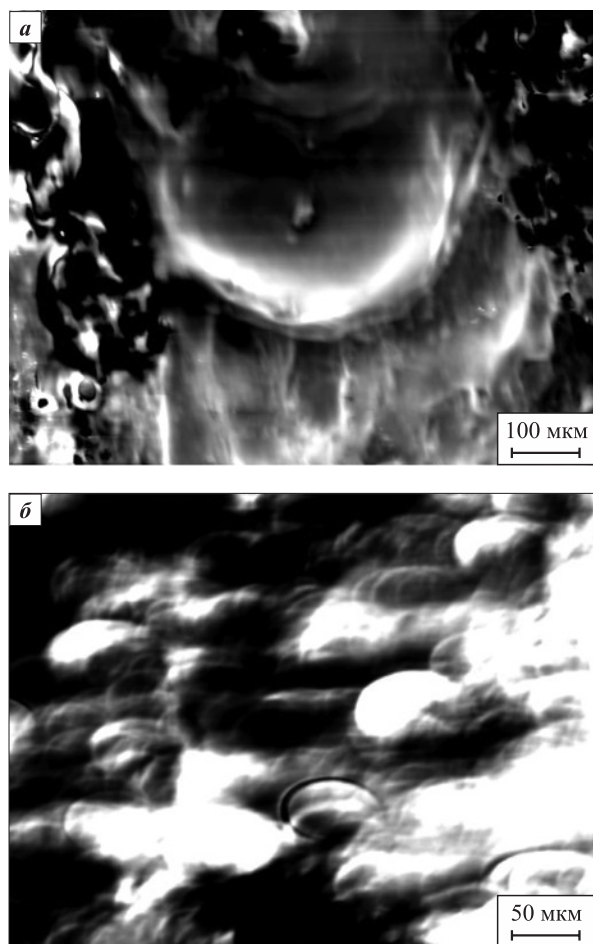


Рис. 2. Изображения поверхности образцов, обработанных на воздухе (а) и в растворе ПС (б)

Fig. 2. Surface images of specimens treated in air (a) and in a polysilicate solution (b)

металла, а слой керамического покрытия получается неоднородным.

Одним из важных эксплуатационных параметров, определяющих качество поверхностного упрочненного слоя, является износостойкость. Испытания на фреттинг-изнашивание проводились на многофункциональной испытательной системе SRV Testsystem («Optimol Instruments», GmbH, Германия) при комнатной температуре по схеме диск-шарик без смазки. Материал шарика (контртела) – инструментальная сталь ШХ15 после упрочняющей термической обработки; амплитуда колебаний составляла 3 мм, частота – 2 Гц, нагрузка на образец – 10 Н, длительность испытаний – 10 мин. По полученным результатам можно сделать вывод, что величина износа поверхности образца сплава ВАЛ110 после лазерной обработки в растворе ПС составила менее 40 мкм, а на необработанном – 60 мкм. Коэффициент трения для обработанного образца при испытаниях незначительно превысил 0,8, а для исходного он был заметно выше 1 (рис. 4).

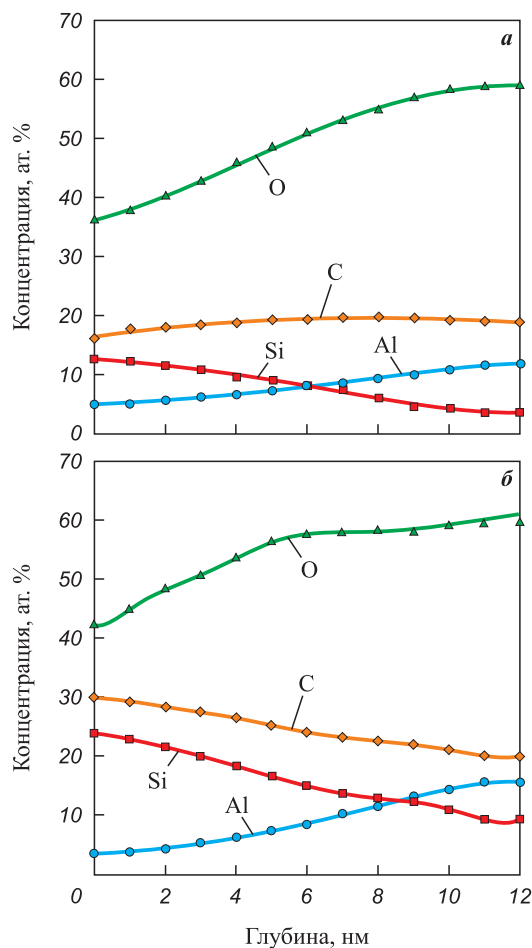


Рис. 3. Распределение элементов по глубине поверхностного слоя при концентрациях раствора ПС 6 % (а) и 12 % (б)

Fig. 3. Element distribution across the surface layer at polysilicate solution concentrations of 6 % (a) and 12 % (b)

Появление оксидных и карбидных составляющих в поверхностном слое после лазерной обработки должно повлиять на микротвердость. Было проведено исследование микротвердости поверхности образца из алюминиевого сплава ВАЛ110 с нанесенным оксидным покрытием на микротвердомере ПМТ-3М (ЛОМО, Россия). В качестве индентора использовалась 4-гранная алмазная пирамида Виккерса. Полученные результаты показывают, что средний размер диагонали отпечатка составил 50 мкм при нагрузке 0,196 Н и выдержке 15 с, что эквивалентно твердости 14,8 кг/мм². Микротвердость исходного образца была определена тем же методом и составила 9,1 кг/мм², т.е. ниже на 62,6 %, по сравнению с модифицированным образцом с покрытием. Образованием соединений более высокой твердости на поверхности алюминиевого сплава в сравнении с основным материалом можно объяснить и снижение коэффициента трения.

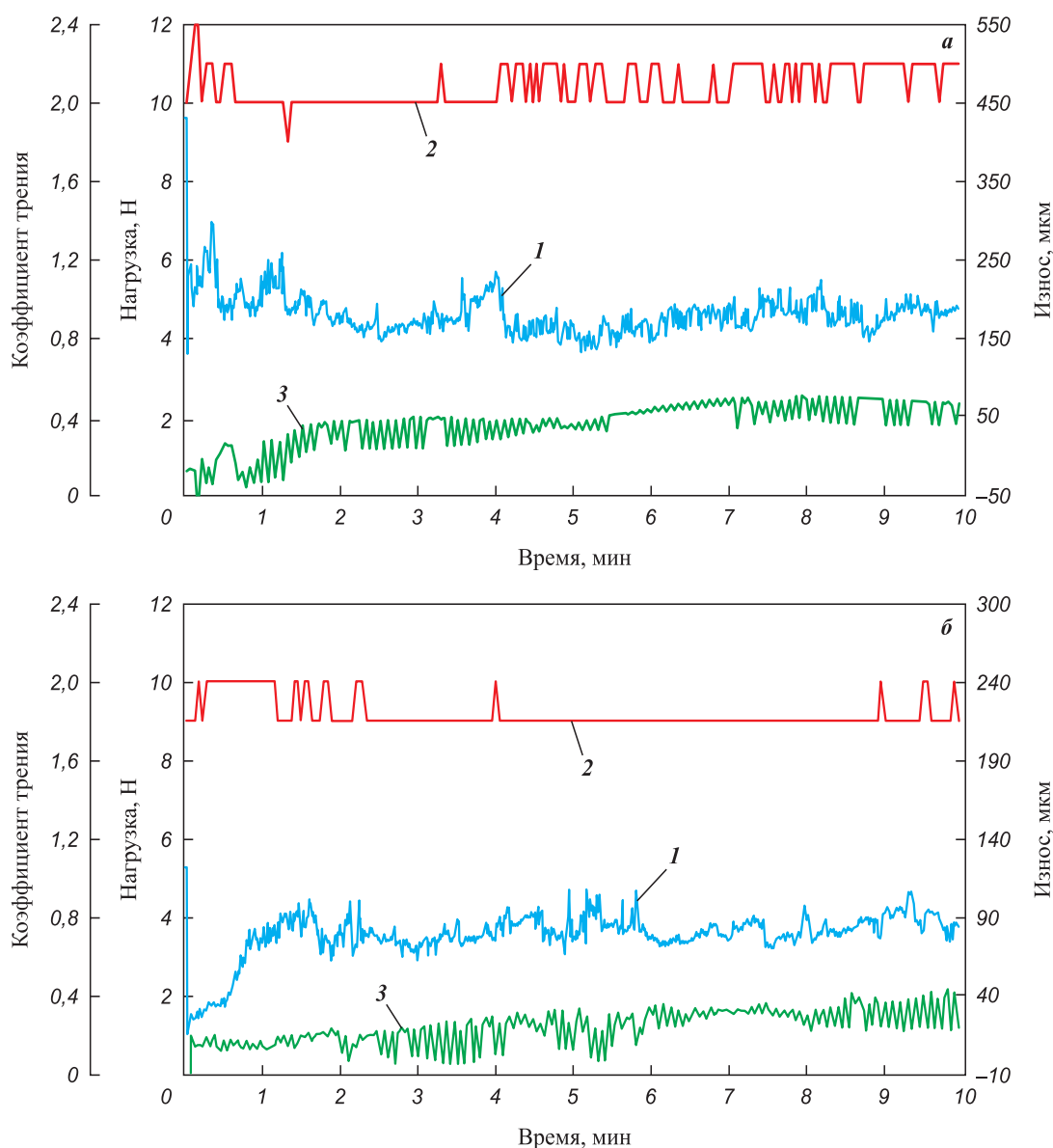


Рис. 4. Результаты испытаний на фреттинг-изнашивание исходного образца сплава ВАЛ10 (а) и обработанного лазерным излучением в растворе полисиликата концентрацией 12 % (б):

1 – коэффициент трения; 2 – нагрузка; 3 – износ

Fig. 4. Results of fretting wear tests of the original VAL10 alloy specimen (а) and specimen treated with laser radiation in a 12 % polysilicate solution (б):

1 – friction coefficient; 2 – load; 3 – wear

Закключение

Анализ модифицированной поверхности образцов алюминиевого сплава ВАЛ10 показал зависимость свойств поверхностного слоя от режимов процесса модификации. Изменение параметров лазерной обработки (частоты следования импульсов, коэффициента заполнения поверхности), а также концентрации и толщины слоя раствора над поверхностью образца позволяет регулировать величину воздействия и в конечном итоге – химический состав элементов образующегося покрытия.

В ходе исследования установлено, что лазерная обработка образцов сплава ВАЛ10 в растворе полисиликатов существенно влияет на их эксплуатационные характеристики, в частности повышает стойкость поверхности к истиранию и обеспечивает ее упрочнение.

Список литературы / References

1. Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Тихонова Е.П. Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов. *Вестник МГТУ*

- «Станкин». 2012;2(20):140–143.
<http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/596>
Tarasova T.V., Gvozdeva G.O., Tikhonova E.P. Prospects for the use of laser radiation for surface treatment of non-ferrous alloys. *Vestnik of MGTU "Stankin"*. 2012;2(20):140–143. (In Russ.).
<http://www.stankin-journal.ru/ru/articles/596>
2. Witkin D.B., Patel D.N., Helvajian H. Surface treatment of powder-bed fusion additive manufactured metals for improved fatigue life. *Journal of Materi Engineering and Perform.* 2019;28:681–692.
<https://doi.org/10.1007/s11665-018-3732-9>
3. Hatamleh M. I., Mahadevan J., Malik A. Prediction of residual stress random fields for selective laser melted A357 aluminum alloy subjected to laser shock peening. *Journal of Manufacturing Science & Engineering.* 2019; 141(10):101011. <https://doi.org/10.1115/1.4044418>
4. Смирнов С.В., Шандаров С.М., Каранский В.В. Принудительное лазерное наноструктурирование поверхности алюмооксидной керамики. *Успехи прикладной физики.* 2021;9(3):224–234.
<https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-3-224-234>
Smirnov S.V., Shandarov S.M., Karanskii V.V. Forced laser nanostructuring of the surface of alumina ceramics. *Uspekhi prikladnoi fiziki.* 2021;9(3):224–234. (In Russ.).
<https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-3-224-234>
5. Zhihao H., Wenjun W., Zelin M. Anti-icing ceramics surface induced by femtosecond laser. *Ceramics International.* 2022;48(7):10236–10243.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.238>
6. Сатаева Н.Е., Емельяненко К.А., Домантовский А.Г. Лазерная обработка алюминиевых сплавов для создания атмосферостойких супергидрофобных покрытий. *Российские нанотехнологии.* 2020;15(2):158–163.
<https://doi.org/10.1134/S199272232002017X>
Sataeva N.E., Emel'yanenko K.A., Domantovskii A.G. Laser processing of aluminum alloys to create weather-resistant superhydrophobic coatings. *Rossiiskie nanotekhnologii.* 2020;15(2):158–163. (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S199272232002017X>
7. Jinliang Z., Qingsong W., Dave B. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology.* 2019;35(2):270–284.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.004>
8. Кисель А.Г., Белан Д.Ю., Тодер Г.Б. Исследование возможности чистовой лазерной обработки заготовок из алюминиевого сплава Д16. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2020;22(3):33–43.
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-33-43>
Kisel' A.G., Belan D.Yu., Toder G.B. Investigation of the possibility of finishing laser processing of workpieces made of aluminum alloy D16. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty).* 2020;22(3):33–43. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2020-22.3-33-43>
9. Riveiro A., Quintero F., Boutinguiza M. Laser cutting of aluminum alloy Al-2024-T3. *Procedia Manufacturing.* 2017;13:396–401.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.028>
10. Куис Д.В., Волочко А.Т., Шегидевич А.А., Свидунovich Н.А., Омелюсик А.В., Лежнев С.Н., Мухамедзянова Э.Р., Кузнецова О.Н. Композиционные материалы, полученные при обработке алюминиевого расплава лигатурами, содержащими углеродные частицы. *Вестник Казанского технологического университета.* 2014;17(18):143–145.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22480202>
Kuis D.V., Volochko A.T., Shegidevich A.A., Svidunovich N.A., Omelyusik A.V., Lezhnev S.N., Mukhamedzyanova E.R., Kuznetsova O.N. Composite materials obtained by processing aluminum melt with ligatures containing carbon particles. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2014;17(18):143–145. (In Russ.). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22480202>
11. Shinkaryov A.S., Ozherelkov D.Y., Pelevin I.A. Laser fusion of aluminum powder coated with diamond particles via selective laser melting: Powder preparation and synthesis description. *Coatings.* 2021;11(10):1219.
<https://doi.org/10.3390/coatings11101219>
12. Козлова А.А., Кузнецова В.А., Козлов И.А. Влияние длительных нагревов на свойства защитных покрытий для алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg. *Авиационные материалы и технологии.* 2019;2(55):74–80.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80>
Kozlova A.A., Kuznetsova V.A., Kozlov I.A. Influence of prolonged heating on the properties of protective coatings for aluminum alloy of the Al–Si–Mg system. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii.* 2019;2(55):74–80. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80>
13. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences.* 2016;34(2):120–163.
<https://doi.org/10.1177/0734904115626720>
14. Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Макаров А.В. Влияние лазерного легирования порошковыми смесями Cu–Zn–Ti и Si–Cu на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2019;21(4):70–84.
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>
Savrai R.A., Malygina I.Yu., Makarov A.V. Influence of laser alloying with Cu–Zn–Ti and Si–Cu powder mixtures on the structure and properties of cast aluminum alloy. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty).* 2019;21(4):70–84. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>
15. Wang P., Deng L., Prashanth K.G. Microstructure and mechanical properties of Al–Cu alloys fabricated by selective laser melting of powder mixtures. *Journal of Alloys and Compounds.* 2018;735:2263–2266.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.168>

16. Tomida S., Nakata K. Fe–Al composite layers on aluminum alloy formed by laser surface alloying with iron powder. *Surface and Coatings Technology*. 2003; 174-175:559–563.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00698-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00698-4)
17. Aboulkhair N., Everitt N., Maskery I. Selective laser melting of aluminum alloys. *MRS Bulletin*. 2017;42(4): 311–319. <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.63>
18. Александров В.Д., Петрова Л.Г., Морщилов М.В. Лазерное легирование поверхностных слоев алюминиевых сплавов с целью повышения их износостойкости. *Технология металлов*. 2019;10:33–39.
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2019-10-0-33-39>
Aleksandrov V.D., Petrova L.G., Morshchilov M.V. Laser alloying of surface layers of aluminum alloys in order to increase their wear resistance. *Tekhnologiya metallov*. 2019;10:33–39. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31044/1684-2499-2019-10-0-33-39>
19. Yiming C., Guochao G., Huijun Y. Laser surface alloying on aluminum and its alloys: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018;100:23–37.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.006>
20. Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminum alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 2015;74:401–477.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.03.002>
21. Quazi M.M., Fazal M.A., Farazila Y. Laser-based surface modifications of aluminum and its alloys. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2016;41(2):106–131.
<https://doi.org/10.1080/10408436.2015.1076716>
22. Шиганов И.Н., Самарин П.Е. Модифицирование поверхности алюминиевых сплавов карбидами кремния методом лазерного оплавления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. 2012;5:62–68.
<http://engjournal.ru/articles/226/html/files/assets/basic-html/page1.html>
Shiganov I.N., Samarin P.E. Surface modification of aluminum alloys with silicon carbides by laser melting. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroyeniye*. 2012;5:62–68. (In Russ.).
<http://engjournal.ru/articles/226/html/files/assets/basic-html/page1.html>
23. Pratik S., Subhasisa N., Guanjuan W. Surface property modifications of silicon carbide ceramic following laser shock peening. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017;37(9):3027–3038.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.005>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Дмитрий Геннадьевич Калюжный – к.т.н., доцент кафедры «Физика и оптотехника», Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова; ст. науч. сотрудник Научного центра металлургической физики и материаловедения, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

 **ORCID:** 0000-0001-9704-3952

 **E-mail:** dikdik@mail.ru

Михаил Вячеславович Палабугин – магистрант кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

 **ORCID:** 0000-0002-8311-0779

 **E-mail:** mr.kadochnikov777@mail.ru

Иван Николаевич Бурнышев – к.ф.-м.н., вед. науч. сотрудник Научного центра металлургической физики и материаловедения, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

 **ORCID:** 0009-0001-8485-5123

 **E-mail:** inburn@mail.ru

Василий Федорович Лыс – вед. инженер лаборатории материаловедения и термометрических процессов, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

 **ORCID:** 0009-0005-0534-4608

 **E-mail:** vflis@mail.ru

Владимир Иванович Ладьянов – д.ф.-м.н., гл. научный сотрудник, Научного центра металлургической физики и материаловедения, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

 **ORCID:** 0000-0002-7751-1007

 **E-mail:** vilad@udman.ru

Dmitriy G. Kalyuzhnyi – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department “Physics and Optotechnics”, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; Senior Researcher of Scientific Center for Metallurgical Physics and Materials Science, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (UdmFRC UB RAS)

 **ORCID:** 0000-0001-9704-3952

 **E-mail:** dikdik@mail.ru

Mikhail V. Palabugin – Undergraduate of the Department “Instruments and Measurement, Control, Diagnostics”, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

 **ORCID:** 0000-0002-8311-0779

 **E-mail:** mr.kadochnikov777@mail.ru

Ivan N. Burnyshev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher Scientist of Scientific Center for Metallurgical Physics and Materials Science, UdmFRC UB RAS

 **ORCID:** 0009-0001-8485-5123

 **E-mail:** inburn@mail.ru

Vasiliy F. Lys – Leading Engineer of the Laboratory of Materials Science and Thermal Deformation Processes, UdmFRC UB RAS

 **ORCID:** 0009-0005-0534-4608

 **E-mail:** vflis@mail.ru

Vladimir I. Ladyanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Research Scientist of Scientific Center for Metallurgical Physics and Materials Science, UdmFRC UB RAS

 **ORCID:** 0000-0002-7751-1007

 **E-mail:** vilad@udman.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

Д. Г. Калюжный – определение цели работы, проведение экспериментов, написание текста статьи.

М. В. Палабугин – подготовка исходных образцов и смеси для нанесения покрытий, проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов и написании статьи.

И. Н. Бурнышев – подготовка исходных образцов и смеси для нанесения покрытий, проведение экспериментов.

В. Ф. Лыс – исследование фреттинг-изнашивания полученных покрытий, определение микротвердости покрытий.

В. И. Ладыанов – определение цели исследования и методики его проведения.

D. G. Kalyuzhnyi – formulated the purpose of the work, research objectives, wrote the manuscript.

M. V. Palabugin – prepared initial specimens and coating mixtures, conducted experiments, participated in result discussions and manuscript writing.

I. N. Burnyshev – prepared initial specimens and coating mixtures, conducted experiments.

V. F. Lys – investigated fretting wear of the coatings, determined their microhardness.

V. I. Ladyanov – formulated the research objectives and methodology for its implementation.

Статья поступила 10.03.2023 г.
Доработана 02.06.2023 г.
Принята к публикации 05.06.2023 г.

Received 10.03.2023
Revised 02.06.2023
Accepted 05.06.2023