

УДК 621.789:538.911

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ СПЛАВА АК5М2 ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТИТАНОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А. А. Серебрякова, Д. В. Загуляев, Ю. А. Шлярова, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов

Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Методами рентгенофазового анализа исследованы параметры кристаллической решетки и фазовый состав образцов сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. Методами сканирующей электронной микроскопии исследована дефектная субструктура образцов. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, выявлены оптимальные режимы электронно-пучковой обработки, приводящие к формированию в поверхностном слое сплава структуры с повышенными механическими свойствами.

Ключевые слова: сплав АК5М2, напыление пленки титана, электронно-пучковая обработка, предел прочности, предел текучести, параметр кристаллической решетки

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10059).

Для цитирования: Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (39). С. 63 – 68.

LATTICE, PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE AK5M2 ALLOY SURFACE-MODIFIED WITH TITANIUM AND SUBSEQUENT ELECTRON BEAM IRRADIATION

A. A. Serebryakova, D. V. Zagulyaev, Yu. A. Sklyarova, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov

Siberian State Industrial University (42 Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region–Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The parameters of the crystal lattice and the phase composition of the AK5M2 alloy samples surface-modified with titanium, followed by electron beam irradiation, were studied by X-ray phase analysis. The defective substructure of the samples was investigated by scanning electron microscopy. Based on the conducted tests of the AK5M2 alloy samples, surface-modified with titanium, optimal modes of electron beam processing were identified, leading to the formation of the structure characterized by improved mechanical properties in the alloy surface layer.

Keywords: AK5M2 alloy, titanium film deposition, electron beam processing, tensile strength, yield strength, crystal lattice parameter

Financing. The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 19-79-10059).

For citation: Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Lattice, phase composition and structure of the AK5M2 alloy surface-modified with titanium and subsequent electron beam irradiation. *Bulletin of SibSIU*. 2022, no. 1 (39), pp. 63 – 68. (In Russ.).

Введение

В настоящее время в области физического материаловедения уделяется большое внимание повышению прочностных свойств металлов и сплавов за счет обработки концентрированными потоками энергии [1, 2]. К методам модифицирования поверхностных свойств относятся легирование поверхностного слоя напылением пленки, ионные пучки, обработка при помощи плазмы и ультразвука. Одним из наиболее оптимальных методов, является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [3 – 5]. Она по сравнению с остальными методами модифицирования имеет ряд преимуществ (высокую энергетическую эффективность, более высокую однородность плотности энергии по сечению потока, хорошую воспроизводимость импульсов и высокую частоту их следования).

Модифицирование поверхностного слоя также возможно с помощью напыления тонкой пленки на поверхность материала и последующего переплавления пленки с поверхностным слоем (подложкой) вакуумно-дуговым методом [6]. Исходя из результатов современных исследований [7 – 11], наибольшего эффекта в модифицировании поверхностных слоев металлов и сплавов можно достигнуть благодаря комплексной обработке и комбинированию методов энергетических воздействий. Одним из видов комплексной обработки является комбинирование легирования путем нанесения пленки на поверхность исследуемого материала методом ионно-плазменного напыления с последующим переплавлением модифицированного слоя электронным пучком. Применение таких инновационных методов обработки позволяет повысить прочностные свойства поверхности материалов и сплавов, а, следовательно, и улучшить прочностные свойства изготовленных из них деталей.

В связи с вышеперечисленным, настоящая работа является актуальной, так как ее цель состоит в исследовании влияния облучения электронным пучком сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, а именно на изменение структуры поверхности, фазового состава и параметров кристаллической решетки.

Методы и принципы исследования

В качестве материала исследований использован сплав АК5М2, образцы в форме пропорциональных лопаток (толщина 2,48 мм; ширина 9,1 мм; длина рабочей части 15,0 мм).

Формирование композитного материала происходило вакуумно-дуговым методом на автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установке «КВИНТА» [11]. На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной 0,5 –

1,0 мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах процесса: образцы располагали напротив дугового испарителя, напыление проводили без вращения образца, ток дугового испарителя $I_d = 80$ А (ток электродинамической стойкости); $I_n = 20$ А (пусковой ток); $I_H = 135$ А (номинальный ток); $\gamma = 75$ %; $U_{cm} = 35$ В; $p = 0,3$ Па; $t = 10$ мин.

Образцы облучали при разной плотности энергии пучка электронов E_s : режимы 1 – 5 при 10, 20, 30, 40, 50 Дж/см².

Исследования поверхности разрушения проводили методами сканирующей электронной микроскопии [12], используя прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV. Исследования фазового состава и параметров кристаллической решетки проводили методами рентгенофазового анализа [13] с использованием дифрактометра Shimadzu XRD 6000.

Основные результаты

Результаты рентгенофазового анализа

Качественный и количественный фазовый состав, выявленные методами рентгенофазового анализа, показывают разнообразное распределение элементов на поверхности материала в зависимости от режима обработки.

Основными фазами в исходном состоянии сплава АК5М2 являются алюминий, кремний и Si_3N_4 . Облучение сплава АК5М2 импульсным электронным пучком сопровождается изменением параметра кристаллической решетки фазы алюминия.

В результате рентгенофазового анализа сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком (режим 1), выявлен состав, представленный фазами алюминия, кремния и титана. При режиме 2 фазовый состав представлен алюминием, титаном и фазой Al_3Ti . При повышении плотности энергии пучка электронов (режим 3) выявлены фазы Al и Al_3Ti . При дальнейшем увеличении плотности энергии пучка электронов (режим 4) фазовый состав представлен исключительно фазой алюминия. При исследованиях образца после ЭПО (режим 5) были обнаружены фазы Al и Al_3Ti , а также фаза CuO.

Для фаз Al и Al_3Ti методами рентгенофазового анализа были определены параметры кристаллической решетки сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. Выявлены изменения по сравнению с исходным литым состоянием сплава АК5М2 (рис. 1).

Представлено изменение параметра кристаллической решетки фазы алюминия в зависимости от режима ЭПО (рис. 1, а). Из полученных дан-

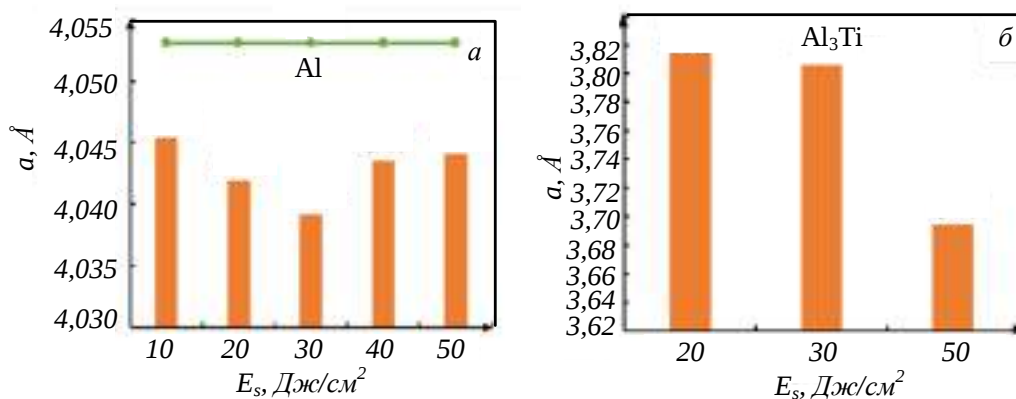


Рис. 1. Параметры кристаллической решетки фаз Al (а) и Al₃Ti (б)
Fig. 1. Parameters of the crystal lattice of phases Al (a) and Al₃Ti (b)

ных видно, что в литом состоянии параметр кристаллической решетки $a = 4,0531$ Å. Далее при применении ЭПО значения показывают уменьшение размера постоянной решетки по всем режимам. Наименьший размер ($a = 4,0392$ Å) постоянной решетки выявлен при режиме 3. При уменьшении размера параметра кристаллической решетки происходит уплотнение структуры кристаллической решетки, что в свою очередь может привести к изменениям свойств исследуемого материала.

На рис. 1, б представлена динамика параметра кристаллической решетки фазы Al₃Ti, которая выявляется только в трех из пяти режимов обработки. Как показано на диаграмме, образованию фазы Al₃Ti способствуют режимы ЭПО при $E_s = 20$ Дж/см² ($a = 3,8148$ Å), $E_s = 30$ Дж/см² ($a = 3,8054$ Å) и $E_s = 50$ Дж/см² ($a = 3,6942$ Å). Наблюдается обратно пропорциональная связь параметра кристаллической решетки a со значением плотности энергии пучка электронов E_s . С увеличением E_s происходит уменьшение параметра кристаллической решетки фазы Al₃Ti.

Результаты сканирующей электронной микроскопии

Результаты сканирующей электронной микроскопии позволили провести анализ структуры поверхности образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном. Характерные изображения структуры поперечных шлифов и поверхности образца исследуемого сплава демонстрируют морфологически разнообразный характер материала (рис. 2, 3). Рассмотрим подробнее изображения по каждому режиму обработки.

На рис. 2 представлено изображение, полученное методами СЭМ-анализа поперечного шлифа образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном.

Образцы были обработаны электронным пучком по пяти режимам с повышением плотности

пучка электронов от 10 до 50 Дж/см² (рис. 2). С увеличением плотности пучка энергии электронов, структура образца становится более однородной (рис. 2, в, г). При меньших значениях плотности пучка электронов в структуре наблюдается большее количество интерметаллидов (рис. 2, б) и микропор (рис. 2, а).

На рис. 3 представлены результаты СЭМ-анализа поверхности сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком.

Образцы также были обработаны электронным пучком с различной плотностью по пяти установленным режимам. На рис. 3, а, б представлена поверхность композитного материала с каплями светло-серого и белого цветов, а также микрократерами. Анализ этих элементов показывает, что это слой пленки, состоящий из атомов титана, который под воздействием ЭПО 10 и 20 Дж/см² начинает постепенно растворяться в слое подложки.

На рис. 3, в представлена поверхность после облучения электронным пучком 30 Дж/см². Можно отметить отсутствие капельной фракции титана на поверхности, структура стала однородной. На рис. 3, г, д демонстрируется состояние поверхности композитного материала после ЭПО с плотностью пучка 40 и 50 Дж/см². Можно отметить появление крупных трещин, причиной которых может быть переплавление материала вследствие нагрева до высокой температуры в процессе ЭПО, а также резкое охлаждение материала после обработки.

Выводы

Установлено, что параметр кристаллической решетки фазы алюминия неоднозначно зависит от плотности энергии пучка электронов. При увеличении E_s происходит монотонное снижение параметра кристаллической решетки с достижением минимума при $E_s = 30$ Дж/см², дальнейшее увеличение приводит к возрастанию параметра a

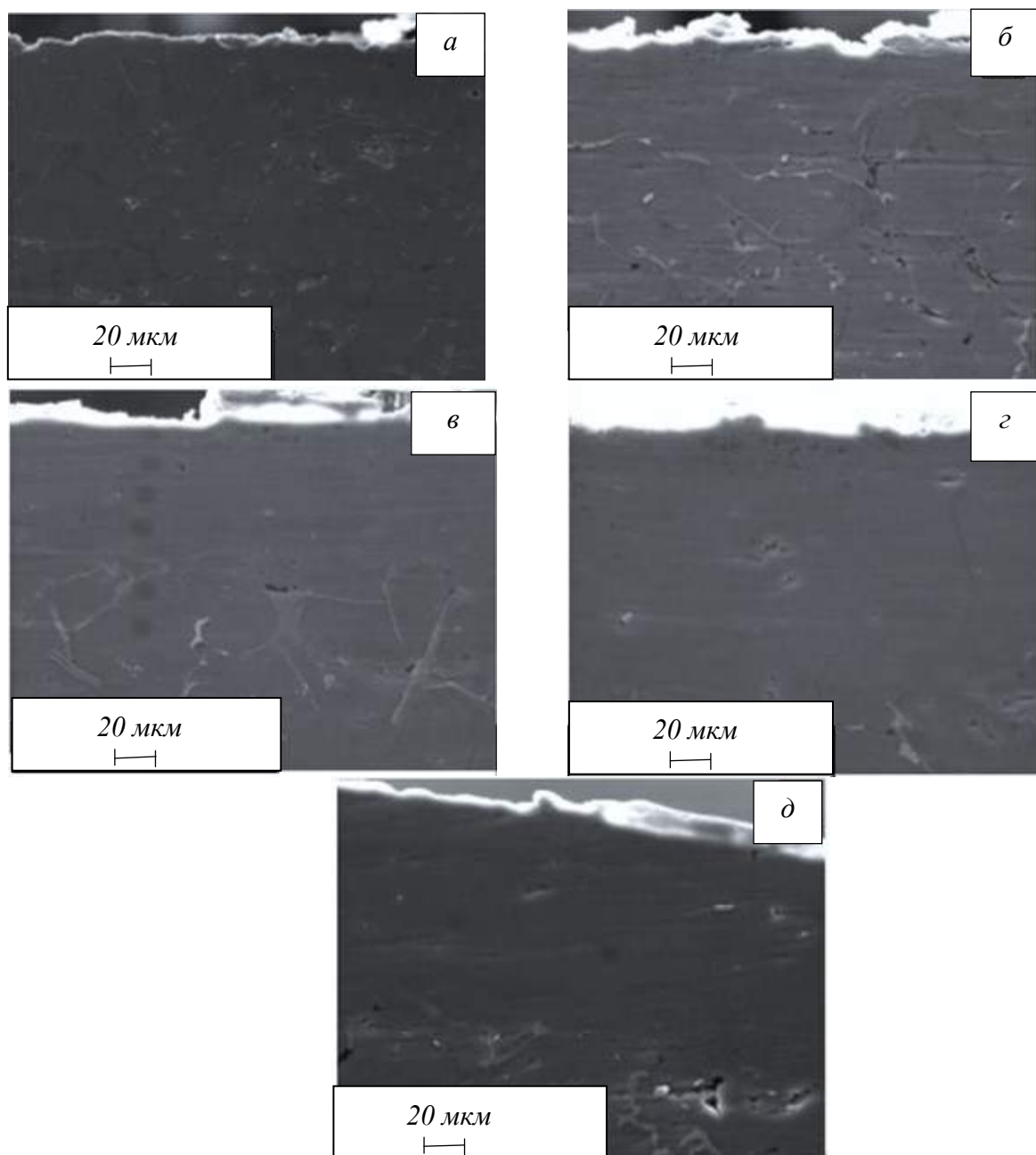


Рис. 2. Структуры поперечных шлифов образцов сплава АК5М2 поверхностно модифицированного титаном

Fig. 2. Structures of transverse sections of AK5M2 alloy samples surface-modified with titanium

при $E_S = 50 \text{ Дж/см}^2$. Параметр кристаллической решетки фазы Al_3Ti обратно пропорционально зависит от плотности пучка электронов (с увеличением E_S происходит снижение параметра решетки фазы Al_3Ti).

Выявлено, что режимы облучения 1 и 2 являются недостаточными по величине плотности пучка энергии электронов для формирования эффективного поверхностного слоя. Режимы 4 и 5 приводят к переплавлению материала, появляется большее количество трещин и микропор, что в свою очередь приводит к разрушению материала. Установлен оптимальный режим электронно-пучковой обработки – 3 ($E_S = 30 \text{ Дж/см}^2$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др. Минск: Беларус. Навука, 2013. 287 с.
2. Волочко А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития // Литье и металлургия. 2015. № 4. С. 39–45.
3. Ren X., Wang R., Wei D., Huang Y., Zhang H. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam // Nuclear Instruments and

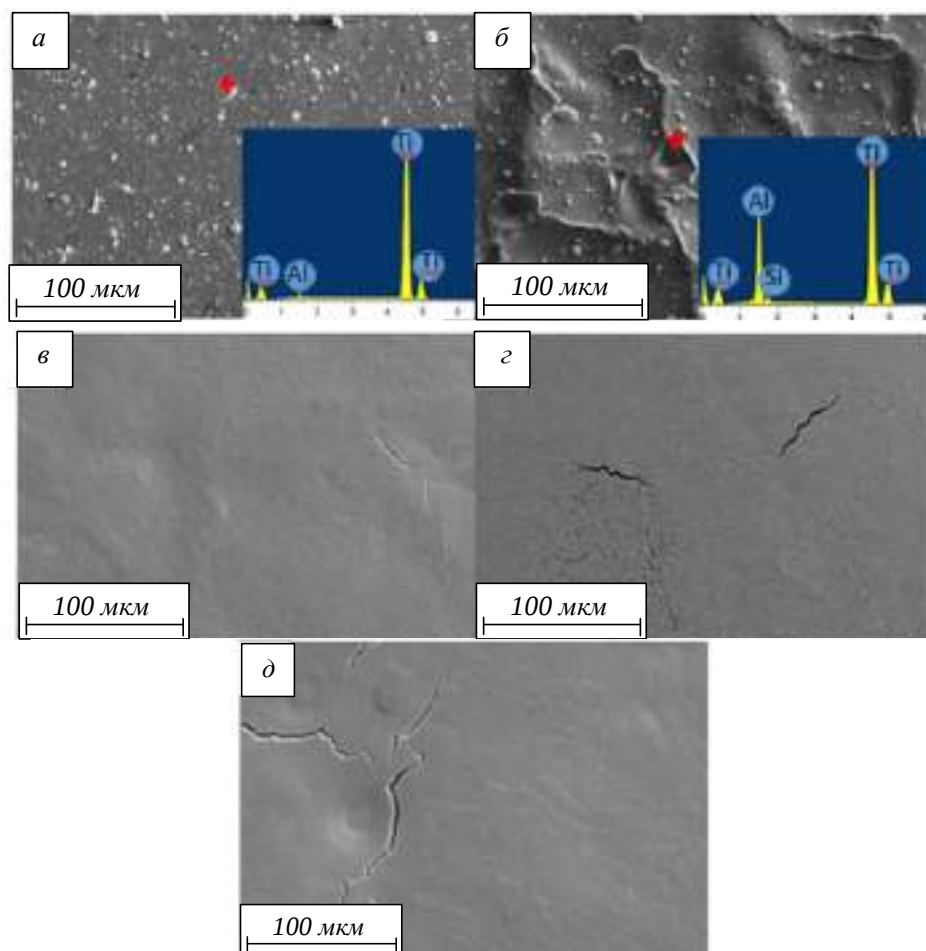


Рис. 3. Структура сплава АК5М2 поверхностно модифицированного титаном после ЭПО
 Fig. 3. Structure of the AK5M2 alloy surface-modified with titanium, followed by electron beam irradiation according to five EPO modes

- Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021. No. 505. P. 44–49.
4. Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010. No. 15. P. 2395–2399.
 5. Белов А.Б., Быценко О.А., Крайников А.В. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения / Под общ. ред. А.С. Новикова, В.А. Шулова, В.И. Энгелько. М.: Дипак, 2012. 292 с.
 6. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под общ. ред. Н.Н. Ковалю, Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
 7. Barrirero J. Eutectic Modification of Al–Si casting alloys. Materials Science. 2019. 113 p.
 8. Федун В., Коляда Ю. Динамика фазовых превращений при поверхностной модификации металлов и сплавов электронным пучком // Вопросы атомной науки и техники. 2010. № 7. С. 316–320.
 9. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys // Problems of Atomic Science and Technology. 2021. P. 126–140.
 10. Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No. 1713. P. 012006.
 11. Ivanov Yu., Klopotov A., Potekae A., Koval N., Vlasov V. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. 168. P. 012070.
 12. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization // Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods Elsevier Ltd. 2016. P. 17–43.
 13. Publisher B. Fundamentals of X-Ray Phase Analysis // Multifunctional two-and three-dimensional polycrystalline x-ray diffractometry. 2012. P. 34–41.

REFERENCES

1. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. et al. *Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment*. Minsk: Belarus. Navuka, 2013, 287 p. (In Russ.).

2. Volochko A.T. Modification of eutectic and primary silicon particles in silumins. Prospects of development. *Lit'e i metallurgiya*. 2015, no. 4, pp. 39–45. (In Russ.).
3. Ren X., Wang R., Wei D., Huang Y., Zhang H. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021, no. 505, pp. 44–49.
4. Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2010, no. 15, pp. 2395–2399.
5. Belov A.B., Bytsenko O.A., Krainikov A.V.; Novikov A.S., Shulov V.A., Engel'ko V.I. ed. *High-current pulsed electron beams for aircraft engine building* / M.: Dipak, 2012, 292 p. (In Russ.).
6. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. ed. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys*. Tomsk: Izd-vo NTL, 2016, 312 p. (In Russ.).
7. Barrirero J. Eutectic Modification of Al–Si casting alloys. *Materials Science*. 2019. 113 p.
8. Fedun V., Kolyada Yu. Dynamics of phase transformations during surface modification of metals and alloys by an electron beam. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*. 2010, no. 7, pp. 316–320. (In Russ.).
9. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, pp. 126–140.
10. Andrianova N., Borisov A., Krit B., Mashkova E., Ovchinnikov M., Timofeev M., Umarov F. Ion-plasma modification of the surface of light fiber materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, no. 1713, pp. 012006.
11. Ivanov Yu., Klopotov A., Potekaev A., Koval N., Vlasov V. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, no. 168, pp. 012070.
12. Inkson B.J. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods Elsevier Ltd*. 2016, pp. 17–43.
13. Publisher B. Fundamentals of X-Ray Phase Analysis. *Multifunctional two-and three-dimensional polycrystalline x-ray diffractometry*. 2012, pp. 34–41.

Сведения об авторах

Анна Александровна Серебрякова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com

Дмитрий Валерьевич Загуляев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Юлия Андреевна Шлярова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Information about the authors:

Anna A. Serebryakova, Post-graduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: aserebrakova87@gmail.com

Dmitry V. Zagulyaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Yulia A. Shklyarova, postgraduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: rubannikova96@mail.ru

Yuri F. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High-Current Electronics SB RAS
E-mail: yufi55@mail.ru

Viktor E. Gromov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

© 2022 г. А.А. Серебрякова, Д.В. Загуляев, Ю.А. Шлярова, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов
 Поступила в редакцию 01.02.2022 г.