ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.789:538.911
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВА АК5М2, ПОВЕРХНОСТНО МОДИФИЦИРОВАННОГО ТИТАНОМ

Серебрякова А.А.[1], Загуляев Д.В.[1], Шляров В.В.[1], Шлярова Ю.А.[1], Иванов Ю.Ф.[2], Устинов А.М.[3]

[1] Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия
[2] Институт сильноточной электроники Сибирское отделение Российской академии наук, Томск, Россия
[3] Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

Аннотация. **Актуальность работы.** Применение модифицирования металлов и сплавов методами внешних энергетических воздействий позволяет локально упрочнить поверхностный слой деталей и узлов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов. **Цель работы.** Выявление закономерностей влияния режимов электронно-пучковой обработки на механические характеристики и морфологию поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном. **Используемые методы.** Применены современные методы физического материаловедения. Выполнено поверхностное модифицирование сплава АК5М2 пленкой Ti вакуумно-дуговым методом. Модифицированные образцы сплава АК5М2 облучались интенсивным импульсным электронным пучком при режимах, отличающихся плотностью энергии пучка электронов (от 10 до 50 Дж/см^2). Механические испытания проведены путем одноосного растяжения до разрушения образцов сплава в исходном состоянии, модифицированных образцов до и после облучения по 5-ти режимам. Методами сканирующей электронной микроскопии проведен фрактографический анализ поверхности разрушения образцов, полученных в результате растяжения. **Новизна.** Разработка уникального способа модификации сплава АК5М2 позволяет улучшить его прочностные и морфологические свойства по сравнению с материалом в исходном состоянии. **Результаты.** В результате механических испытаний установлены значения предела текучести, временного сопротивления, относительного остаточного удлинения и сужения при разрыве. Установлена зависимость изменения деформационных характеристик и структуры поверхности разрушения от режимов ЭПО. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном, выявлен режим электронно-пучковой обработки, приводящий к формированию в поверхностном слое структуры, характеризующейся повышенными механическими свойствами. **Практическая значимость.** Поверхностное модифицирование титаном сплава АК5М2 после электронно-пучковой обработки при режиме с применением плостности энергии пучка электронов 30 Дж/см^2 приводит к повышению прочностных характеристик. Параметры данного режима можно использовать для локального упрочнения деталей, изготовленных из данного сплава, например втулочных подшипников.

Ключевые слова: модификация сплавов, электронно-пучковая обработка, вакуумно-дуговой метод, механические характеристики АК5М2, фрактография

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10059, https://rscf.ru/project/19-79-10059/.

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Для цитирования

Исследование механических характеристик и морфологии поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном / Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 32-44. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44

STUDY ON MECHANICAL CHARACTERISTICS AND FRACTURE SURFACE MORPHOLOGY OF THE Ti SURFACE-MODIFIED AK5M2 ALLOY

Serebryakova A.A.[1], Zaguliaev D.V.[1], Shlyarov V.V.[1], Shliarova Yu.A.[1], Ivanov Yu.F.[2], Ustinov A.M.[3]

[1] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia
[2] Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia
[3] Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. **Problem Statement (Relevance).** The modification of metals and alloys by the external energy deposition methods makes it possible to locally strengthen the surface layer of parts and assemblies made of aluminum alloys. **Objective.** This study is aimed at revealing the regularities of the effect of electron beam processing modes on the mechanical characteristics and fracture surface morphology of the Ti surface-modified AK5M2 alloy. **Methods Applied.** The authors used the methods of modern physical materials science. The surface of the AK5M2 alloy was modified with a Ti film by the vacuum arc method. The modified samples of the AK5M2 alloy were irradiated with an intense pulse electron beam in modes differing in the energy density of the electron beam (from 10 to 50 J/cm^2). Mechanical tests were carried out by uniaxial tension to fracture of the alloy samples in the original state, the modified samples before and after the irradiation in 5 modes. Using scanning electron microscopy, the authors carried out a fractographic analysis of the fracture surface of the samples obtained as a result of tension. **Originality.** The development of a unique method for modifying the AK5M2 alloy makes it possible to improve its strength and morphological properties compared to the material in its original state. **Results.** As a result of the mechanical tests, the authors determined the values of yield strength, ultimate tensile strength, relative residual elongation and reduction at fracture. The dependence between the change in the deformation characteristics and the structure of the fracture surface on the electron-beam processing modes was established. Based on the tests performed on the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy, the authors revealed a mode of electron-beam processing, leading to the formation of a surface structure characterized by higher mechanical properties. **Practical Relevance.** The Ti surface modification of the AK5M2 alloy after electron-beam processing in a mode using an electron beam energy density of 30 J/cm^2 results in the increase in the strength characteristics. The parameters of this mode can be used for local hardening of parts made of this alloy, for example, bush bearings.

Keywords: modification of alloys, electron-beam processing, vacuum arc method, mechanical characteristics of AK5M2, fractography

The research was funded by the grant from the Russian Science Foundation, No.19-79-10059, https://rscf.ru/project/19-79-10059/.

The research was carried out using the equipment of the Materials Science Shared Use Center at Siberian State Industrial University.

For citation

Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V., Shlyarov V.V., Shliarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Study on Mechanical Characteristics and Fracture Surface Morphology of the Ti Surface-Modified AK5M2 Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 32-44. https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44

Введение

Модификация свойств поверхностных слоев легких металлов и сплавов, таких как силумин [1, 2], является не только весьма распространенной областью исследований, но и актуальной в настоящее время [3]. Общеизвестно, что наибольшую нагрузку и, соответственно, разрушение детали начинается именно с поверхности. В связи с этим требования, предъявляемые к качеству подготовки, свойствам и характеристикам поверхностных слоев ответственных изделий, неуклонно увеличиваются. Алюминиевые сплавы системы Al-Si наиболее широкое применение нашли в автомобилестроении [4-6] и авиакосмической промышленности [7]. Свойства поверхностных слоев изделий, применяемых в данных отраслях, должны обеспечивать высокую надежность и износостойкость. Факторами, определяющими эффективность работы поверхностного слоя изделий, являются прочность и твердость упрочненной зоны, однородность структуры и свойств, высокое сопротивление разрушению, сопротивление к образованию трещины [8].

На данный момент в области физического материаловедения уделяется большое внимание повышению свойств металлов и сплавов за счет обработки концентрированными потоками энергии [9, 10]. К методам модифицирования поверхностных свойств относятся: ионные пучки, обработка при помощи плазмы и ультразвука и др. Одним из наиболее эффективных и экологичных методов является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [11-13]. Преимуществами ЭПО по сравнению с остальными методами модифицирования можно назвать: высокую энергетическую эффективность, более высокую однородность плотности энергии по сечению потока, хорошую воспроизводимость импульсов и высокую частоту их следования. Это направление развивается на базе созданных установок «Solo» [14-16], «Gesa» [17-19] и «Nadezhda» [20-22].

Известен также способ легирования поверхностного слоя с помощью напыления тонкой пленки на поверхность материала и последующего переплавления пленки с поверхностным слоем (подложкой) вакуумно-дуговым методом [23]. Как показывают современные исследования, максимального эффекта в модифицировании поверхностных слоев металлов и сплавов можно достигнуть благодаря комплексной обработке и комбинированию методов энергетических воздействий [24-28]. Одним из видов комплексной обработки является комбинирование легирования путем нанесения пленки на поверхность исследуемого материала методом ионно-плазменного напыления с последующим переправлением модифицированного слоя электронным пучком. Применение данных инновационных методов обработки позволяет повысить прочностные свойства поверхности материалов и сплавов, а следовательно, и увеличить механические свойства изготовленных из них деталей.

В связи с вышеперечисленным данная работа является актуальной, так как ее цель состоит в исследовании влияния облучения электронным пучком на сплав АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, а именно на изменение механических свойств при растяжении, а также изменение фрактографии изломов разрушенных образцов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований использован сплав АК5М2, образцы в форме пропорциональных лопаток в литом состоянии. В литом состоянии образцы имели следующие размеры: 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» [29]. На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной (0,5-1) мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах процесса: образцы располагались напротив дугового испарителя, напыление производилось без вращения образца, ток дугового испарителя $I_Д = 80$ А (ток электродинамической стойкости), $I_П = 20$ А (пусковой ток), $I_н = 135$ А (номинальный ток), $\gamma = 75$ %, $U_{см} = 35$ В, $p = 0,3$ Па, $t = 10$ мин.

Облучение импульсным электронным пучком проводилось на установке «Соло» [30]. В ходе эксперимента значения параметров работы установки при облучении были следующие: энергия ускоренных электронов $U = 17$ кэВ, плотность энергии пучка электронов E_S =10, 20, 30, 40, 50 Дж/см^2, длительность импульсов $\tau = 200$ мкс, количество импульсов $n = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с$^{-1}$; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Па. Данные параметры являются рациональными параметрами электронно-пучковой обработки, приводящими к формированию в модифицированном слое градиентных, многоэлементных, многофазных, наноструктурированных состояний с уникальными свойствами. Изменение этих параметров в меньшую либо большую сторону не приводит к такому результату. Выбор представленных в данной работе режимов ЭПО обусловлен широким объемом исследований, подтвердивших на практике эффективность данных параметров по сравнению с другими. Результаты исследований, свидетельствующие о высокой эффективности данных параметров при повышении микротвердости, износостойкости, представлены в монографии [31].

Механические испытания сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «Instron 3386» с постоянной скоростью 1,25 мм/мин [32]. Одноосному растяжению подвергались образцы сплава АК5М2 в литом состоянии, АК5М2, поверхностно модифицированный Ti, и АК5М2, поверхностно модифицированный Ti с последующим ЭПО, по режимам: 1 режим – плотность энергии пучка электронов $E_S = 10$ Дж/см^2, 2 режим – $E_S = 20$ Дж/см^2, 3 режим – $E_S = 30$ Дж/см^2, 4 режим – $E_S = 40$ Дж/см^2, 5 режим – $E_S = 50$ Дж/см^2. Исследования поверхности разрушения проводили методами сканирующей электронной микроскопии [33-35], используя прибор «Philips SEM-515» с микроанализатором EDAX ECON IV.

Результаты исследований

В результате механических испытаний сплава АК5М2 в литом состоянии, сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком по 5-ти режимам, были установлены режимы, при которых наблюдается изменение механических характеристик сплава. На **рис. 1** представлены деформационные кривые разрушения материала в координатах «напряжение (МПа) – деформация (%)» для сплава АК5М в исходном состоянии, АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим ЭПО (E_S = 30 Дж/см^2).

На **рис. 1** представлены деформационные кривые, полученные в результате одноосного растяжения образцов сплава АК5М2 в различном состоянии. Кривая 1 показывает процесс растяжения до разрушения образца сплава АК5М2 в литом состоянии, напряжение при разрушении составило 118 МПа. Кривая 2 получена в результате растяжения до разрушения сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, напряжение при разрушении данного образца составляет 155 МПа. Кривая 3 получена в результате растяжения до разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком по режиму 3 (E_S = 30 Дж/см^2), напряжение при разрушении составило 140 МПа. Таким образом, по деформационным кривым наблюдается увеличение значения напряжения при разрушении образцов сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti (см. **рис. 1**, кривая 2) и сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком (см. **рис. 1**, кривая 3) в режиме №3, по сравнению со значениями, полученными при разрушении образца сплава АК5М2 в литом состоянии (см. **рис. 1**, кривая 1).

Анализ результатов исследования механических характеристик, таких как временное сопротивление и предел текучести, представлен на гистограммах (**рис. 2**).

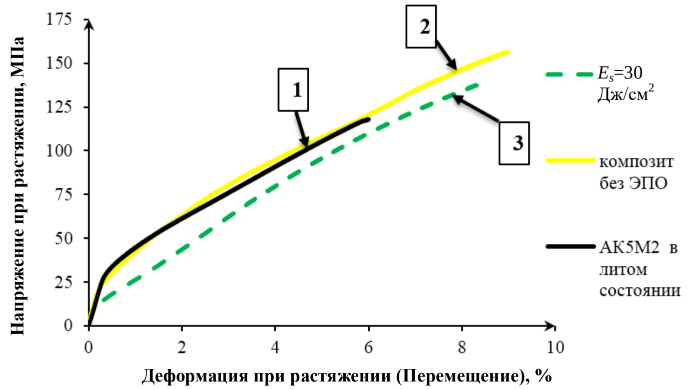
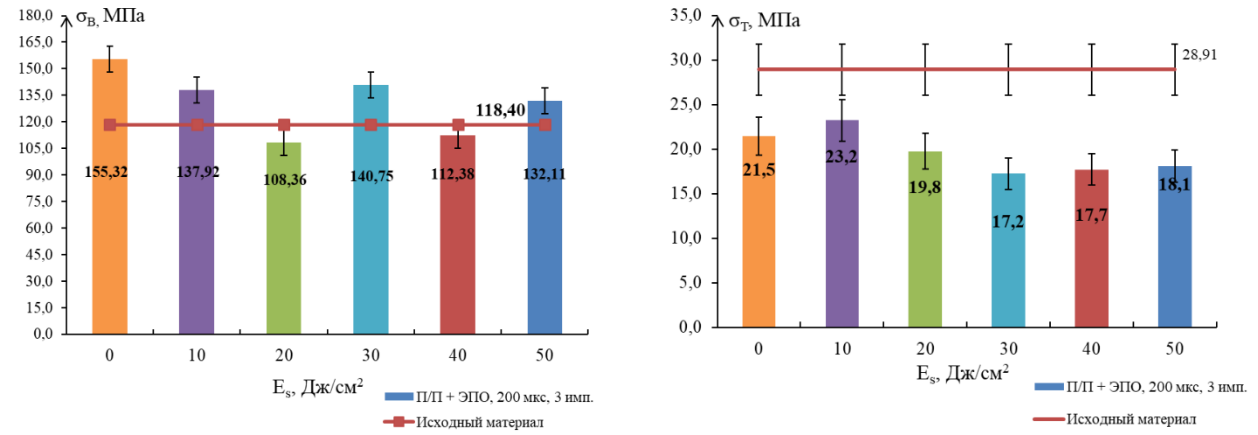


Рис. 1. Деформационные кривые разрушения материала
Fig. 1. Stress-strain curves of the material



а б

Рис. 2. Зависимость временного сопротивления (а) и изменение предела текучести (б) в зависимости от значения плотности пучка электронов от режима обработки
Fig. 2. Relationship between ultimate tensile strength (a) and the change in yield strength (б), and the electron beam density in the processing mode

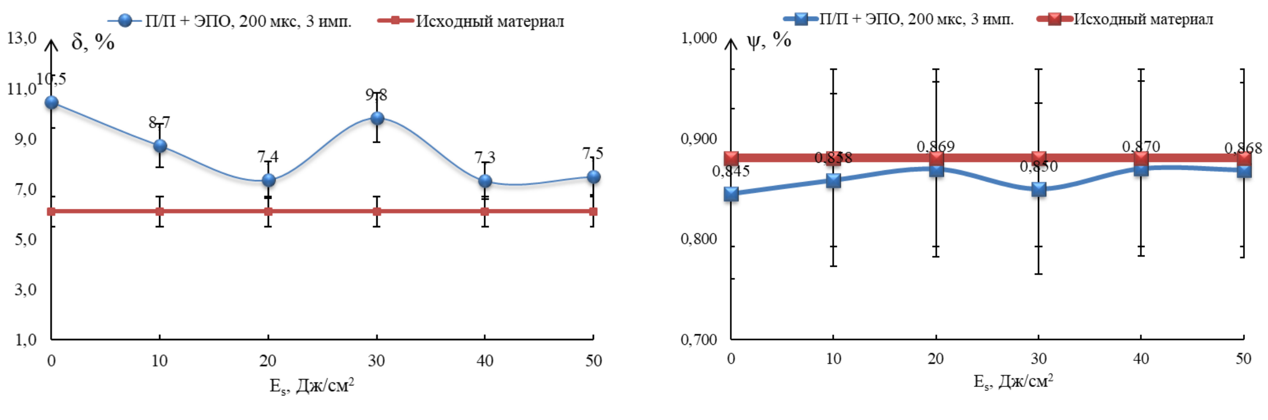
В процессе механических испытаний путем одноосного растяжения были разрушены образцы сплава АК5М2 в литом состоянии, образцы сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, и образцы сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком по 5-ти режимам, описанным выше. Временное сопротивление системы пленка(титан)/подложка(силумин) составил 155,3 МПа, что на 31,2% больше по сравнению с литым состоянием. Далее по режимам 2 и 4 наблюдается снижение временного сопротивления облученных образцов на 8,4 и 5% соответственно. Значение временного сопротивления по режиму 5 ЭПО находится в рамках погрешности с режимом 4. Таким образом, утверждать, что при данном режиме облучения происходит увеличение исследуемой характеристики, не представляется возможным. Предположительно, снижение временного сопротивления материала связано с разупрочнением материала под влиянием энергетического воздействия. Облучение электронным пучком влияет на процесс разупрочнения посредством перераспределения точечных дефектов и дислокаций в сплаве, образующихся при пластической деформации образцов.

По режимам 1 и 3 ЭПО системы пленка(титан)/подложка(силумин) выявляется рост временного сопротивления по сравнению с материалом в литом состоянии (режим 1 – 16,5%; режим 3 – 18,8%). Как показано в работе [36], существует две причины измнения прочностных и пластических характеристик сплава АК5М2 при ЭПО: 1) образование ячеистой, субмикрокристаллической структуры высокоскоростной кристаллизации; 2) растворение инетрматаллидов в облученном слое.

По результатам механических испытаний были определены значения предела текучести по всем режимам ЭПО (см. **рис. 2, б**).

При одноосном растяжении образца силумина АК5М2 в литом состоянии предел текучести составил 28,91 МПа. При разрушении композитного материала без ЭПО предел текучести равен 21,5 МПа. При всех режимах облучения наблюдается снижение предела текучести. Максимальный эффект влияния на значения предела текучести оказывает режим 3, предел текучести составил 17,2 МПа (ЭПО с плотностью пучка электронов 30 Дж/см^2), что на 40% меньше, чем в литом состоянии. Снижение предела текучести сплава предположительно связано с изменениями его структурных свойств в результате обработки электронным пучком. В процессе обработки происходит изменение дислокационной структуры исследуемого материала, что, в свою очередь, влияет на возникновение напряжений, при которых остаточная деформация в образце распределяется равномерно по его рабочей части, при временном постоянстве растягивающего усилия [37].

После испытаний на растяжение до разрушения вычислены параметры относительного остаточного удлинения (**рис. 3, а**) и относительного остаточного сужения (**рис. 3, б**) при разрыве образцов силумина, модифицированных по всем представленным в настоящей работе режимам. Данные параметры являются характеристиками пластичности материала [38].



а б

Рис. 3. Относительное остаточное удлинение (а) и относительное остаточное сужение образцов (б) при разрушении в литом состоянии и после электронно-пучковой обработки

Fig. 3. Relative residual elongation (a) and relative reduction at fracture of the samples (б) in the original state and after electron-beam processing

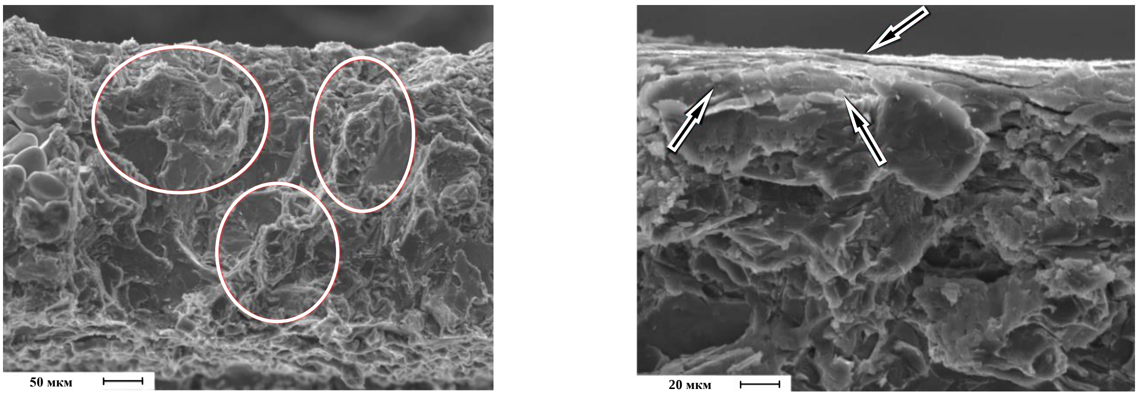
В литом состоянии процент остаточного удлинения образца при разрыве составил δ = 6,1% (красная линия на **рис. 3, а**). По режимам 1 и 3 выявляется увеличение значений относительного остаточного удлинения по сравнению с литым состоянием. При нулевом значении плотности энергии пучка электронов (разрушение необлученного образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti), значение относительного остаточного удлинения увеличилось до δ = 10,5%. При растяжении образцов, облученных по режиму 1, значение относительного остаточного удлинения составило 8,7%. При режимах 2, 4 и 5 не выявлено изменений значения в пределах погрешности измерения. После облучения по режиму 3 значение относительного остаточного удлинения составило δ = 9,8%.

На основании механических испытаний получены данные о значениях относительного остаточного удлинения образцов (см. **рис. 3, б**). В литом состоянии (красная линия на **рис. 3, б**) образец АК5М2 имеет значение относительного остаточного сужения ψ = 0,880%. При растяжении необлученного образца композитного материала, состоящего из подложки, изготовленной из сплава АК5М2 с поверхностно модифицированным слоем Ti, остаточное сужение образцов при разрушении ψ = 0,845. Далее получены значения по режимам: режим 1 – ψ = 0,858; режим 2 – ψ = 0,869; режим 3 – ψ = 0,850, режим 4 – ψ = 0,870, режим 5 – ψ = 0,868. Таким образом, проанализировав полученные значения, можно отметить, что значения остаточного сужения образца в процессе механических испытаний находятся в пределах погрешности измерений. Отсутствие изменений в пределах погрешности измерений позволяет утверждать о том, что изменение плотности энергии пучка электронов не оказывает влияния на относительное остаточное сужение образца.

В исследовании [39] с помощью РФА и СЭМ-анализа выявлена динамика морфологии поверхности сплава АК5М2, модифицированного Ti. При режимах 1 и 2 на поверхности сплава АК5М2, модифицированного Ti, СЭМ-анализ выявил наличие не полностью растворенных капель титана (состав на рентгенограмме), что говорит о недостаточности энергии плотности пучка электронов для образования однородного покрытия. Режимы 4 и 5, характеризующиеся большими значениями плотности энергии пучка электронов, напротив, приводят к чрезмерному высокотемпературному переплавлению материала. Данный процесс способствует образованию кратеров, трещин, микроуглублений на поверхности и в слое материала, что может привести к разрушению материала в процессе эксплуатации. На основании результатов РФА и СЭМ-анализа сплава АК5М2 после напыления на его поверхность пленки титана с последующей обработкой электронным пучком по различным режимам выявлен режим обработки, при котором образуется однородная мелкозернистая структура без трещин, микроуглублений и других дефектов. Очевидно, что данный режим воздействия (режим 3) приведет к существенной трансформации свойств материала в сторону их улучшения.

Ниже представлены результаты сканирующей электронной микроскопии изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti при различных режимах облучения.

На **рис. 4** изображены фрактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2.



а б

Рис. 4. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2

Fig. 4. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 10 J/cm^2

Анализ излома образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см^2, показывает ступенчатый тип микрорельефа поверхности разрушения, характерный для хрупкого излома. Цвет микрорельефа пепельно-серый, без блеска. Ступеньки изогнутой формы расположены на различном уровне друг от друга (**рис. 4, а**). Предположительно, образование такого элемента микрорельефа, как ступенька, может происходить в результате скола вдоль границ двойников [40, 41]. На **рис. 4, б** наблюдается слой Ti, постепенно растворяющегося под воздействием ЭПО.

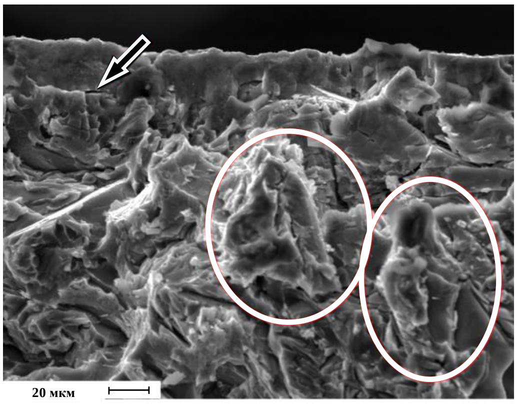
На **рис. 5** изображены фрактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см^2.

С увеличением плотности энергии пучка электронов до 20 Дж/см^2 при обработке сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, наблюдаются изменения морфологии поверхности излома. Как видно на **рис. 5**, напыленный слой Ti под воздействием ЭПО становится более однородным с поверхностью сплава АК5М2. Ступени и гребни на поверхности излома характеризуются большим размером (**рис. 5, а**), по сравнению с предыдущим СЭМ-изображением излома при обработке с меньшей плотностью энергии пучка электронов, и составляет от 40 до 70 мкм. Размер напыленного слоя составляет около 20 мкм (**рис. 5, б**, стрелки).

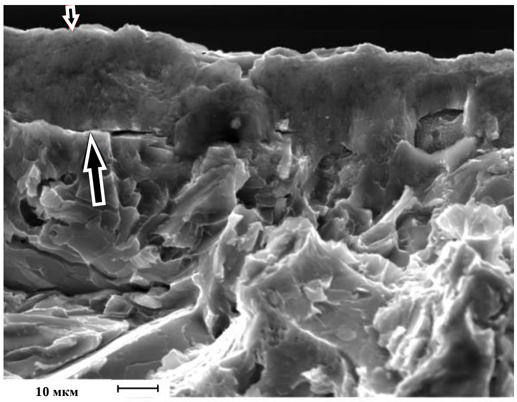
На **рис. 6** изображены фрактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2.

Исследования морфологии поверхности излома образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti и облученного с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2, выявляют наименьшую ступенчатость микрорельефа излома, по сравнению с изломами образцов, полученных при двух предыдущих режимах обработки. Размер напыленного слоя составляет 20-23 мкм (**рис. 6, а**). Структура излома становится более однородной, без ярко выраженных гребней и ступеней. Выявлено образование ячеистого строения излома (**рис. 6, б**, стрелки), с размерами ячеек от 0,5 мкм. Также наблюдается образование ямок (микроуглубления) внутри излома (**рис. 6, б**, овалы). Данный вид микроуглублений образуется при пластическом течении сплава в процессе растяжения [30].

На **рис. 7** изображены фрактограммы изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 40 и 50 Дж/см^2.



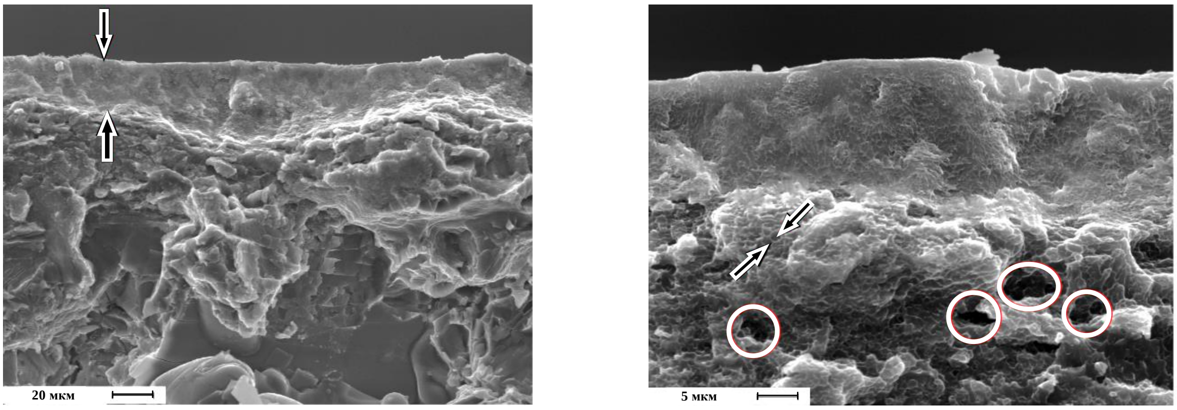
а



б

Рис. 5. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 20 Дж/см^2

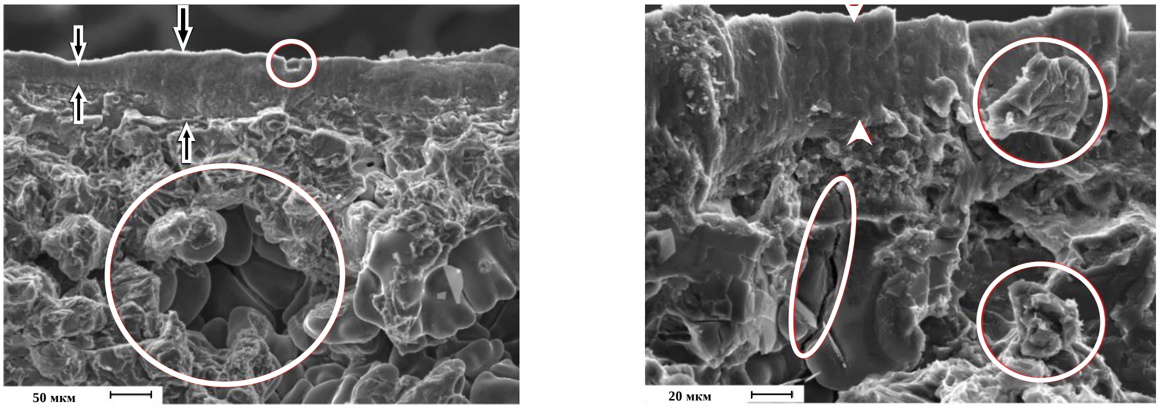
Fig. 5. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 20 J/cm^2



а б

Рис. 6. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2

Fig. 6. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 30 J/cm^2



а б

Рис. 7. Изображение структуры изломов образцов сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком с плотностью энергии пучка электронов 40 Дж/см^2 (а) и 50 Дж/см^2 (б)

Fig. 7. Image of the fracture structure of the samples of the Ti surface-modified AK5M2 alloy followed by electron beam irradiation with an electron beam energy of 40 J/cm^2 (a) and 50 J/cm^2 (б)

Увеличение плотности энергии пучка электронов до 40 Дж/см^2 при облучении сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti, привело к формированию неоднородной поверхности излома, по сравнению с поверхностью, полученной при обработке с плотностью энергии пучка электронов 30 Дж/см^2. Размер напыленного слоя составляет 20-50 мкм (**рис. 7, а**, стрелки). В поверхности напыленного слоя выявляются углубления (предположительно трещины), которые могут быть очагом разрушения материала (**рис. 7, а**, овал). В слое сплава АК5М2 выявляются ямки размерами около 100 мкм. Морфология излома образца сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti и облученного с максимальным (из представленных режимов) значением энергии пучка электронов 50 Дж/см^2, представлена разнообразным строением, включающим трещины (**рис. 7, б**), различными выемками и выступами. Размер напыленного слоя также неоднородный.

Заключение

1. В процессе одноосного растяжения до разрушения образцов в разном состоянии получены кривые процесса деформации сплава АК5М2. При растяжении образцов сплава АК5М2, модифицированного Ti и облученного электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см^2 (режим 3), выявлен максимальный показатель временного сопротивления $\sigma_п$ = 140,7 МПа, который превысил показатель исходного материала на 18,8%, что

говорит о повышении прочности исследуемого материала благодаря электронно-пучковой обработке при этом режиме. Кроме того, при облучении по режиму 3 (30 Дж/см^2) предел текучести системы снизился до $\sigma_т$ = 17,2 МПа, в сравнении с литым состоянием значение уменьшилось на 40%. Параметр относительного остаточного удлинения образца, поверхностно модифицированного титаном и облученного при режиме 3, достиг значения δ = 9,8%, превысив значение в литом состоянии на 60%. Следует отметить, что согласно ГОСТ 1583-93 типовыми режимами термообработки сплава АК5М2 являются режимы Т5 (закалка и кратковременное (неполное) искусственное старение) и Т8 (закалка и смягчающий отпуск), в результате которых достигается значение временного сопротивления разрыву в 206 и 147 МПа соответственно. Однако термообработка сплавов приводит к изменению структуры и свойств всего объема материала, и к тому же процесс является очень длительным по времени, тогда как ЭПО позволяет локально изменять физико-механические характеристики за счет создания градиента температур (10^6-10^7 К/с) между обрабатываемой поверхностью и объемом материала.

2. Фрактография поверхности излома образцов позволила выявить, что при режимах 1 и 2 величина плотности энергии пучка электронов является недостаточной для формирования однородного материла, структура излома образцов, облученных по данным режимам, характеризуется высокой ступенчатостью. При режиме 3 ступенчатый характер излома снижается, происходит формирование ровного однородного поверхностного слоя. Структура становится мелкоячеистой, без трещин, ямок и микроуглублений, что говорит об увеличении прочностных характеристик материала. Режимы 4 и 5 приводят к образованию глубоких трещин и кратеров, выявленных в структуре излома. Происходит переплавление материала, обработка по данным режимам не приводит к формированию эффективного поверхностного слоя. Наличие в предповерхностных слоях материала дефектов структуры, к которым можно отнести микротрещины и ямки, можно объяснить механизмом, согласно которому преобразование структурных элементов происходит вследствие разрушения пластин кремния из-за различия коэффициентов линейного термического расширения матрицы и включения. Так как по сравнению с алюминиевой матрицей объемная доля пластин кремния мала, то основной вклад в тепловое расширение вносит алюминиевая матрица. Коэффициент линейного расширения алюминия в 4 раза больше, чем кремния. В этой связи тепловые расширения (сжатия) двух фаз в большинстве случаев несовместны. Это приводит к неизбежному возникновению механических напряжений между фазами. Включения кремния способны ассимилировать только 1/4 теплового расширения (сжатия), передаваемого алюминиевой матрицей, через собственное тепловое расширение (сжатие). Остальная часть идет на деформацию матрицы и разрушение пластин кремния (вследствие их хрупкости). Возникновение трещин обусловлено неоднородностями поверхности включения. Образовавшиеся трещины будут являться капиллярами для атомов алюминия. Механические напряжения, создаваемые трещинами, будут аналогами капиллярных сил, перемещающих атомы матрицы в образовавшиеся промежутки между включениями, а в обратном направлении идут потоки вакансий и атомов кремния.

3. Увеличение временного сопротивления можно связать с формированием внутри материала однородной структуры, выявленной по результатам фрактографии. Отсутствие в материале концентраторов напряжений в виде различных дефектов (трещины, ямки, кратеры) обуславливает способность материала сопротивляться разрушению.

4. На основании проведенных испытаний образцов сплава АК5М2, модифицированного Ti с последующим облучением электронным пучком, выявлен режим электронно-пучковой обработки, приводящий к формированию в поверхностном слое силумина структуры, характеризующейся повышенными механическими свойствами, выявленными при одноосном растяжении образцов. Режим 3 обладает наиболее выгодным сочетанием параметров обработки: энергия ускоренных электронов U = 17 кэВ, плотность энергии пучка электронов E_S = 30 Дж/см^2, длительность импульсов τ = 200 мкс, количество импульсов n = 3, частота следования импульсов f = 0,3 с$^{-1}$, давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $p = 2\cdot10^{-2}$ Па.

Таким образом, в данной работе доказано влияние электронно-пучковой обработки на повышение прочности, пластичности, изменение морфологии исследуемого сплава АК5М2, поверхностно модифицированного Ti.

Список источников

1. Otani B. Silumin and its Structure // J. Inst. Met. 2022, no. 36, 1926 p.
2. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting // J. Alloys Compd. 2018, vol. 15(745), pp. 487-502.
3. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions // Litiyo i Metallurgiya. 2018, vol. 91, no. 2, pp. 12-15.
4. Anantha Padmanaban D., Kurien G. Silumins. The automotive alloys // Advanced Materials and Processes. 2012, no. 170, pp. 28-30.
5. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods / S. Samat, M.Z. Omar, A.H. Baghdadi, I.F. Mohamed, A.M. Aziz // J. Mater. Res. Tech. 2021, no. 10, pp. 1086-1102.
6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components // International Materials Reviews. 2014, vol. 59, no. 3, pp. 132-158.
7. Robles Hernandez F.C., Herrera Ramírez J.M., Mackay R. Al-Si Alloys: Automotive, Aeronautical, and Aerospace Applications. Cham, 2017.
8. Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: СФУ, 2012. 196 с.
9. 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.
10. Волочко А.Т. Модифицирование эвтектических и первичных частиц кремния в силуминах. Перспективы развития // Литьё и металлургия. 2015. №4. С. 39-45.
11. Study on surface alloying of 38CrMoAl steel by electron beam / Ren X., Wang R., Wei D. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021, vol. 505, pp. 44-49.
12. Influence of irradiation number of high current pulsed electron beam on the structure and properties of M50 steel / Xu F., Tang G., Guo G., Ozur G. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms. 2010, vol. 15, pp. 2395-2399.
13. The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of Al-Si alloys with different silicon content / D.V. Zaguliaev, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, V.V. Shlyarov, Yu.A. Rubannikova // Progress in Physics of Metals. 2021, vol. 22, no. 1, pp. 129-157.
14. A facility for metal surface treatment with an electron beam / N.N. Koval', P.M. Shchanin, V.N. Devyatkov, V.S. Tolkachev, L.G. Vintizenko // Instruments and Experimental Techniques. 2005, vol. 48, pp. 117-121.
15. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere // Instruments and Experimental Techniques. 2015, vol. 58, pp. 687-695.
16. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams // Russian Physics Journal. 2008, vol. 51, pp. 505-516.
17. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / V. Engel'ko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // Vacuum. 2001, vol. 62/2-3, pp. 211-216.
18. Electron beam facility GESA-SOFIE for in-situ characterization of cathode plasma dynamics / R. Fetzer, W. An, A.Weisenburger, G. Müller // Vacuum. 2017, vol. 145, pp. 179-185.
19. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades / V.A. Shulov, A.N. Gromov, D.A. Teryaev, V.I. Engel'ko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016, vol. 57, pp. 256-265.
20. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials // Surface Coat. Technol. 1997, vol. 96, pp. 117-122.
21. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials / D.I. Proskurovsky, V.P. Rotshtein, G.E. Ozur, A.B. Markov, D.S. Nazarov, M.A. Shulov, Yu. F. Ivanov, R.G. Buchheit // Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 1998, vol. 16, pp. 2480-2488.
22. Ozur, G.E., Proskurovsky D.I. Generation of Low-Energy High-Current Electron Beams in Plasma-Anode Electron Guns // Plasma Physics Reports. 2018, vol. 44, pp. 18-39.
23. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
24. Barrirero J. Eutectic Modification of Al-Si casting alloys. Materials Science. 2019, 113 p.
25. 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.
26. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys // Problems of Atomic Science and Technology. 2021, pp. 126-140.
27. 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.
28. Эволюция структуры и свойств силумина АК10М2Н, облученного интенсивным импульсным электронным пучком / В.Е. Громов, И.Ф. Иванов, Д.В. Загуляев и др. // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 12. С. 1372-1378.

29. Electron-ion-plasma modification of the structure and properties of commercial steels / Yu. Ivanov, A. Klopotov, A. Potekaev, N. Koval, V. Vlasov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, no. 168, 012070.
30. Zaguliaev D., Gromov V., Konovalov S. Electron-Ion-Plasma Modi- fication of a Hypereutectic Al-Si Alloy (1st Edition), CRC Press, 2020.
31. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой: монография / В.Е. Громов, Д.В. Загуляев, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, С.А. Невский, В.Д. Сарычев, Е.А. Будовских, Ю.А. Рубанникова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. 287 с.
32. ISO 6892-1:2016. Metallic materials – Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature. 2016. 79 p.
33. 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.
34. Primig S., Theska F., Haghdadi N. 'Electron Microscopy Methods', in Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Elsevier, 2021, pp. 203-211.
35. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols (3rd Ed.). Humana Press, Totowa, NJ, 2014, 799 p.
36. Evolution of strength properties and defect substructure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress / D.V. Zaguliaev, Yu.F. Ivanov, A.A. Klopotov, A.M. Ustinov, V.V. Shlyarov, D.F. Yakupov. Materialia, 2021, vol. 20, 101223.
37. Zbigniew H., Stachurski Z., Wang G., Tan X. Plastic deformation and yield strength of metals // An Introduction to Metallic Glasses and Amorphous Metals. 2021, pp. 235-312.
38. Chung K., Lee M.-G. Basics of Continuum Plasticity: Plasticity Characteristics (in Simple Tension / Compression). Springer, 2018, pp. 23-42.
39. Dynamics of elemental and phase composition of the surface of AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam / A.A. Serebryakova, D.V. Zagulyaev, Yu.A. Shlyarova. Yu.F. Ivanov and A.M. Ustinov // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1081-1088.
40. Герасимова Л.П., Ежов А.А., Маресев М.И. Изломы конструкционных сплавов: справочник. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
41. Чегуров М.К., Сорокина С.А. Основы фрактографического анализа изломов образцов из конструкционных сплавов: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. 79 с.

References

1. Otani B. Silumin and its structure. J. Inst. Met. 2022;(36):1926.
2. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. J. Alloys Compd. 2018;15(745):487-502.
3. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2018;91(2):12-15. (In Russ.)
4. Anantha Padmanaban D., Kurien G. Silumins. The automotive alloys. Advanced Materials and Processes. 2012;(170): 28-30.
5. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. J. Mater. Res. Tech. 2021;(10):1086-1102.
6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. International Materials Reviews. 2014:59(3):132-158.
7. Robles Hernandez F.C., Herrera Ramírez J.M., Mackay R. Al-Si Alloys: Automotive, aeronautical, and aerospace applications. Cham, 2017.
8. Grishchenko N.A., Sidelnikov S.B., Gubanov I.Yu. *Mekhanicheskie svoystva alyuminievykh splavov: monografiya* [Mechanical properties of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2012. 196 p. (In Russ.)
9. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. et al. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoy obrabotkoy* [Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma processing]. Minsk: Belarus. navuka; 2013. 287 p. (In Russ.)
10. Volochko A.T. Modification of eutectic and primary particles of silicon in silumins. Development prospects. *Litiyo i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2015;(4):39-45. (In Russ.)
11. Ren X., Wang R., Wei D. et al. 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;505:44-49.
12. 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;15:2395-2399.
13. Zaguliaev D.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Shlyarov V.V., Rubannikova Yu.A. The effect of high-intensity electron beam on the crystal structure, phase composition, and properties of

Al-Si alloys with different silicon content. Progress in Physics of Metals. 2021;22(1):129-157.
14. Koval N.N., Shchanin P.M., Devyatkov V.N., Tolkachev V.S., Vintizenko L.G. A facility for metal surface treatment with an electron beam. Instruments and Experimental Techniques. 2005;48:117-121.
15. Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. An electron source with a multiaperture plasma emitter and beam extraction into the atmosphere. Instruments and Experimental Techniques. 2015;58:687-695.
16. Koval N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams. Russian Physics Journal. 2008;51:505-516.
17. Engelko V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials. Vacuum. 2001;62(2-3):211-216.
18. Fetzer R., An W., Weisenburger A., Müller G. Electron beam facility GESA-SOFIE for in-situ characterization of cathode plasma dynamics. Vacuum. 2017;145:179-185.
19. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engelko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016;57:256-265.
20. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E. Use of low-energy, high-current electron beams for surface treatment of materials. Surface Coat. Technol. 1997;96:117-122.
21. Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Markov A.B., Nazarov D.S., Shulov M.A., Ivanov Yu. F., Buchheit R.G. Pulsed electron-beam technology for surface modification of metallic materials. Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films. 1998;16:2480-2488.
22. Ozur G.E., Proskurovsky D.I. Generation of low-energy high-current electron beams in plasma-anode electron guns. Plasma Physics Reports. 2018;44:18-39.
23. Koval N.N., Ivanov Yu.F. *Elektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splavov* [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys]. Tomsk: Publishing House of Technical and Scientific Literature; 2016. 312 p. (In Russ.)
24. Barrirero J. Eutectic modification of Al-Si casting alloys. Materials Science; 2019. 113 p.
25. Fedun V., Kolyada Yu. Dynamics of phase transitions during the surface modification of metals and alloys with an electron beam. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of Nuclear Science and Technology]. 2010;(7):316-320. (In Russ.)
26. Bratushka S., Malikov L.V. Ion-plasma modification of titanium alloys. Problems of Nuclear Science and Technology. 2021;126-140.
27. 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;(1713):012006.
28. Gromov V.E., Ivanov I.F., Zagulyaev D.V. et al. Evolution of the structure and properties of AK10M2N silumin under irradiation with a high-intensity pulsed electron beam. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials]. 2018;54(12):1372-1378. (In Russ.)
29. 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;(168):012070.
30. Zaguliaev D., Gromov V., Konovalov S. Electron-ion-plasma modification of a hypereutectic Al-Si Alloy (1st Edition). CRC Press; 2020.
31. Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Nevskiy S.A., Sarychev V.D., Budovskikh E.A., Rubannikova Yu.A. *Struktura i uprochnenie silumina, modifitsirovannogo elektronno-ionnoy plazmoy: monografiya* [Structure and strengthening of silumin modified with electron-ion-plasma processing: monograph]. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University; 2020. 287 p. (In Russ.)
32. ISO 6892-1:2016 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. 2016. 79 p.
33. 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;17-43.
34. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron microscopy methods. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys; Elsevier. 2021;203-211.
35. Kuo J. Electron microscopy: Methods and protocols (3rd ed.). Humana Press, Totowa, NJ; 2014. 799 p.
36. Zaguliaev D.V., Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Shlyarov V.V., Yakupov D.F. Evolution of strength properties and defect sub-structure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress. Materialia. 2021;20:101223.
37. Zbigniew H., Stachurski Z., Wang G., Tan X. Plastic deformation and yield strength of metals. An Introduction to Metallic Glasses and Amorphous Metals. 2021;235-312.
38. Chung K., Lee M.-G. Basics of continuum plasticity: Plasticity characteristics (in simple tension/compression). Springer; 2018;23-42.
39. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Dynamics of elemental and phase composition of the surface of AK5M2 alloy modified with Ti and irradiated by an electron beam. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2022;16(6):1081-1088.
40. Gerasimova L.P., Ezhov A.A., Maresev M.I. *Izlomy konstruktsionnykh splavov: spravochnik* [Fracture of

structural alloys: reference guide]. Moscow: Metallurgiya; 1987. 272 p. (In Russ.)

41. Chegurov M.K., Sorokina S.A. *Osnovy fraktograficheskogo analiza izlomov obraztsov iz konstruktsionnykh splavov: ucheb. posobie* [Basics of an analysis of fracture of structural alloy samples: study guide]. Nizhny Novgorod: Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University; 2018. 79 p. (In Russ.)

Поступила 02.12.2022; принята к публикации 03.02.2023; опубликована 27.03.2023
Submitted 02/12/2022; revised 03/02/2023; published 27/03/2023

Серебрякова Анна Александровна – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Загуляев Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия. Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

Шляров Виталий Владиславович – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Шлярова Юлия Андреевна – аспирант кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Иванов Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия.
Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Устинов Артем Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия.
Email: artemustinov@bk.ru. ORCID 0000-0002-3461-2086

Anna A. Serebryakova – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Dmitriy V. Zaguliaev – PhD (Eng.), Associate Professor of the Finkel Department of Natural Science, iberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

Vitaliy V. Shlyarov – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Yulia A. Shliarova – postgraduate student of the Finkel Department of Natural Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Yury F. Ivanov – DrSc (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics of the Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia.
Email: yufi55@mail.ru. ORCID 0000-0001-8022-7958

Artem M. Ustinov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures, Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia.
Email: artemustinov@bk.ru. ORCID 0000-0002-3461-2086