[1] **В.В. ШЛЯРОВ,**
аспирант
[1] **А.А. СЕРЕБРЯКОВА,**
аспирант
[1] **Д.В. ЗАГУЛЯЕВ,**
доктора техн. наук, заместитель начальника УНИ
[2] **Ю.Ф. ИВАНОВ,**
доктор физ.-мат. наук, профессор
[3] **А.М. УСТИНОВ,**
канд. техн. наук, доцент
[1] *Сибирский государственный индустриальный университет*
[2] *Институт сильноточной электроники Сибирское отделение Российской академии наук*
[3] *Томский государственный архитектурно-строительный университет*

УВЕЛИЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА АК5М2, УПРОЧНЕННОГО МЕТОДОМ ВАККУМНО-ДУГОВОГО НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В работе исследованы механические характеристики сплава АК5М2 упрочненного нанесением титанового покрытия. Покрытия различной толщины (1, 3, 5 мкм) нанесены вакуумно-дуговым методом на образцы в форме пропорциональных лопаток. Образцы подвергали двум видам механических испытаний: одноосное растяжение с постоянной скоростью и усталостное нагружение. Состояние элементного и фазового состава, дефектной субструктуры системы «пленка/подложка» изучали методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии, выявлено, что вакуумно-дуговое напыление пленки титана сопровождается формированием многослойной системы. Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлено, что переходный слой обогащен атомами кремния и содержит атомы титана и алюминия. Индицирование микроэлектронограммы, полученной с напыленной пленки, выявило присутствие, кроме рефлексов α-Ti, рефлексов кремния, алюминида титана состава Al_3Ti, силицида титана состава Ti_5Si_3. Данные микрорентгеноспектрального анализа выявили наличие термодиффузионных процессов, происходящих при напылении пленки титана на силумин. Контактным нанопрофилометром были проведены исследования шероховатости напыленной поверхности, на основании которых установлено, что шероховатость Ra поверхности лопаток сплава АК5М2 после напыления пленки титана толщиной 5 мкм снижается в 2,6 раза по отношению к шероховатости лопаток силумина до напыления пленки титана. Конечным итогом исследования сплава АК5М2 упрочненного нанесением титанового покрытия стали значительные качественные и количественные преобразования исследуемых характеристик.

Ключевые слова: Al-Si, титан, вакуумно-дуговое напыление, усталость, растяжение, структура.

[1] **V.V. SHLYAROV,**
Postgraduate Student
[1] **A.A. SEREBRYAKOVA,**
Postgraduate Student
[1] **D.V. ZAGULIAEV,**
Doctor of Tech. Sciences, Deputy head of UNI
[2] **YU.F. IVANOV,**
Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor
[3] **A.M. USTINOV,**
Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor
[1] *Siberian State Industrial University*
[2] *Institute of High Current Electronics SB RAS*
[3] *Tomsk State University of Architecture and Building*

INCREASING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AK5M2 ALLOY HARDENED BY THE METHOD OF VACUUM-ARC DEPOSITION OF METAL COATINGS

In this paper, the mechanical characteristics of the AK5M2 alloy hardened by applying a titanium coating are studied. Coatings of various thicknesses (1, 3, 5 μm) were deposited by the vacuum-arc method on samples in the form of proportional blades. The samples were subjected to two types of mechanical tests: uniaxial tension at a constant rate and fatigue loading. The state of the elemental and phase composition, the defective substructure of the "film/substrate" system was studied by scanning and transmission diffraction electron microscopy, it was found that vacuum-arc deposition of a titanium film is accompanied by the formation of a multilayer system. X-ray microanalysis revealed that the transition layer is enriched in silicon atoms and contains titanium and aluminum atoms. The indexing of the microelectron diffraction pattern obtained from the deposited film revealed the presence, in addition to the α-Ti reflections, of silicon, titanium aluminide of the composition Al_3Ti, and titanium silicide of the composition Ti_5Si_3. The data of X-ray microanalysis revealed the presence of thermal diffusion processes occurring during the deposition of a titanium film on silumin. A contact nanoprofilometer was used to study the roughness of the deposited surface, on the basis of which it was found that the surface roughness Ra of the blades of the AK5M2 alloy after deposition of a titanium film with a thickness of 5 μm decreases by 2.6 times in relation to the roughness of silumin blades before deposition of the titanium film. The final result of the study of the AK5M2 alloy hardened by applying a titanium coating was a significant qualitative and quantitative transformation of the studied characteristics.

Keywords: Al-Si, titanium, vacuum arc deposition, fatigue, tension, structure.

Введение

Повышение прочностных свойств поверхностных слоев легких металлов и сплавов, таких как алюминиевые сплавы системы Al-Si [1, 2], является достаточно актуальным в настоящее время [3], это связано с широким применением данных сплавов в автомобилестроении [4–6] и авиакосмической промышленности [7]. Требования к изготавливаемым деталям постоянно растут. Решением может стать разработка новых технологий упрочняющих поверхность деталей. Как известно, чем выше прочностные и трибологические свойства поверхности детали или изделия, тем более эффективно оно сопротивляется внешним нагрузкам в процессе эксплуатации.

В целом, технологии по повышению качества поверхности делятся на несколько видов: механические воздействия, химические воздействия, внешние энергетические воздействия, термомеханические воздействия [8].

В данной работе для повышения механических характеристик алюминиевого сплава системы Al-Si, а именно доэвтектического сплава АК5М2, предлагается использование метода вакуумно-дугового нанесения металлических покрытий [9].

Ваккумно-дуговое нанесение металлических покрытий является одним из способов нанесения тонких пленок на поверхности различных материалов. Этот метод основан на использовании электрического разряда в вакуумной камере между металлическими электродами, что приводит к испарению металлического материала и его конденсации на поверхности, которую необходимо покрыть [10]. Данный метод нанесения металлических покрытий широко используется в промышленности для создания различных покрытий с уникальными физико-механическими свойствами, в том числе коррозионностойких, термически- и электрическистойких покрытий, а также в производстве электронных компонентов [11]. В зависимости от условий нанесения, покрытия могут обладать высокой степенью плотности, твердости, химической стойкости, а также могут иметь различные цвета и оттенки.

В рамках текущих исследований в качестве наносимого покрытия предлагается использовать технически чистый титан марки ВТ1-0. Обзор литературы показал, что процесс ваккумно-дугового нанесения металлических покрытий из титана на алюминиевые сплавы позволяет получать покрытия с высокой степенью адгезии и однородной микроструктурой [12]. Это способствует улучшению механических свойств материала, таких как устойчивость к износу и усталости, а также снижению вероятности возникновения коррозии [13].

Покрытия из титановых сплавов обладают рядом преимуществ, которые делают их востребованными в различных отраслях промышленности. Ниже представлены основные преимущества таких покрытий:

1. Высокая коррозионная стойкость: титановые сплавы являются высококоррозионностойкими материалами, что делает их идеальными для использования в условиях, где поверхности металлических изделий подвержены коррозии [14].

2. Прочность и износостойкость: титановые сплавы обладают высокой механической прочностью и износостойкостью, что позволяет им противостоять механическим воздействиям и сохранять свои свойства в течение длительного времени [15].

3. Легкость: титан является легким металлом, что делает его идеальным для применения в конструкциях, где важна легкость изделий. Например, авиационной и космической промышленности [16].

4. Высокая температурная стойкость: титановые сплавы могут выдерживать высокие температуры, что делает их идеальными для использования в условиях, где поверхности металлических изделий подвержены высоким температурам [17].

5. Биосовместимость: титан является биосовместимым материалом, что делает его идеальным для использования в медицинской промышленности, например, при изготовлении имплантов [18].

6. Декоративные свойства: титановые покрытия обладают эстетическими свойствами, что делает их популярными в дизайнерской промышленности [19].

Таким образом, покрытия из титановых сплавов на поверхности металлических изделий обладают многими преимуществами, что делает их идеальными для использования в различных отраслях промышленности. Они обеспечивают высокую коррозионную стойкость, механическую прочность и износостойкость, а также обладают легкостью и высокой температурной стойкостью.

Рассмотрим процесс ваккумно-дугового нанесения металлических покрытий из технически чистого титана марки ВТ1-0 на алюминиевый сплав системы Al-Si (АК5М2) и оценим шероховатость поверхности, предел прочности и текучести, а также усталостную долговечность образцов, до и после нанесения покрытий.

Материалы и методы

В качестве материала исследований использован сплав АК5М2, образцы на растяжение имели форму пропорциональных лопаток. В литом состоянии, образцы имели следующие размеры: толщина 2,48 мм; ширина 9,1 мм; длина рабочей части 15,0 мм (рис. 1, *а*). Образцы для исследований усталостной долговечности имели форму параллелепипеда размерами 4×12×130 мм с двумя концентраторами напряжений в виде полукруга радиусом 20 мм (рис. 1, *б*). Для качественной оценки усталостных характеристик образцов, изготовленных по ГОСТ 25.502-79, их подвергали механической шлифовке наждачной бумагой с уменьшением дисперсности абразивных частиц, поскольку, как показывают исследования, качество подготовки поверхности изделий влияет на показатели сопротивления усталости [20].

Формирование композитного материала происходило вакуумно-дуговым методом на автоматизированной вакуумной ионно-плазменной установке «КВИНТА» [21] На образцы сплава АК5М2 напыляли пленку титана толщиной (1, 3, 5) мкм с помощью дугового испарителя при следующих параметрах: 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), γ = 75 %, $U_{см}$ =35 В, p = 0,3 Па, t = 10 мин. Схематически процесс нанесения покрытия из Ti на образцы, разрушаемые в условиях усталости, представлено на рисунке 2.

Механические испытания сплава АК5М2 поверхностно модифицированного Ti, осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «INSTRON 3386» с постоянной скоростью 1,25 мм/мин. Одноосному растяжению подвергались образцы сплава АК5М2 в литом состоянии, сплав АК5М2 поверхностно модифицированный Ti.

Проведение испытаний на усталость осуществлялось на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба, внешний вид которой приведен на рисунке 3. Образец закрепляется зажимами. Один конец образца остается неподвижным, а к другому прикладывается знакопеременная нагрузка. Изгиб осуществляется с помощью рычажного механизма, который соединяется с валом. При помощи эксцентрика можно изменять амплитуду напряжений. Вал приводится во вращение с помощью электродвигателя. Фотодатчик используется для регистрации числа циклов нагружения. Изменяя напряжение, подаваемое на обмотку электродвигателя, можно изменять частоту вращения двигателя. Во время испытаний определялось число циклов, которые образцы выдерживали до разрушения. Температура испытаний во всех случаях была комнатной (~300 K). Частота нагружений образцов изгибом составляла ~ 3,3 Гц. Чтобы образец до разрушения выдерживал не менее 105 циклов нагружения, экспериментально подбирали верхнее значение напряжения цикла нагрузки и амплитуды нагружения.

Изучение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы «пленка (Ti)/(АК5М2) подложка», подвергнутых облучению электронным пучком проводили методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии [22–24].

Результаты и обсуждение

Характерные изображения пленки приведены на рисунке 4. На поверхности пленки наблюдается незначительное ($1{,}6\times10^{-3}$ 1/мкм^2) количество микрокапель (указаны стрелками на рис. 5, *б*).

Рис. 1. Внешний вид образцов сплава АК5М2 для механических испытаний

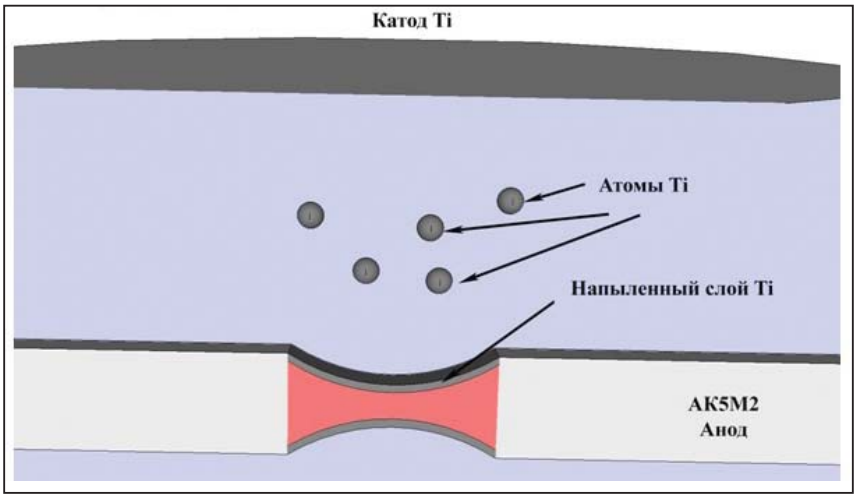

Рис. 2. Схема формирования пленки титана вакуумно-дуговым методом на поверхности образцов силумина АК5М2

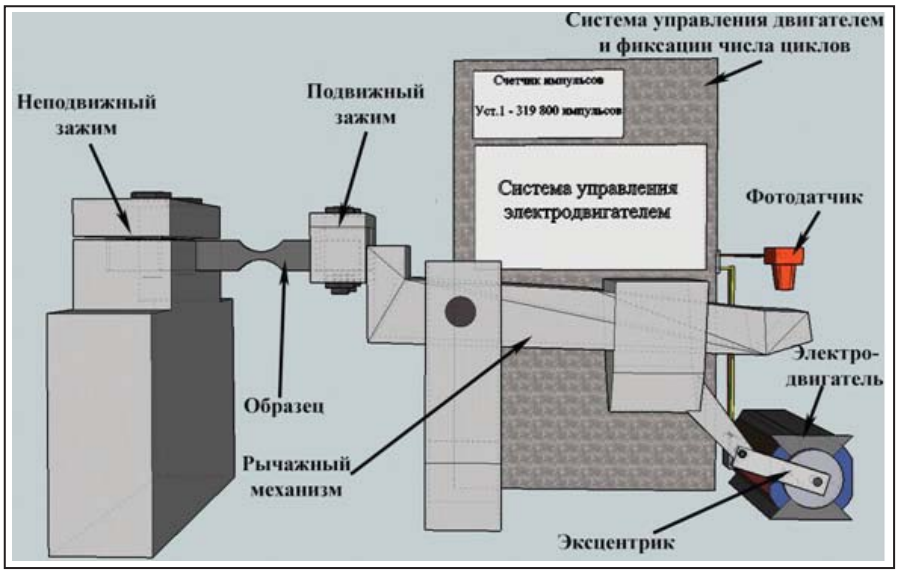

Рис. 3. Принципиальная схема установки для усталостных испытаний

Размеры микрокапель изменяются в пределах от 1,1 мкм до 3,5 мкм.

Состояние элементного и фазового состава, дефектной субструктуры системы «пленка/подложка» изучали методами просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что вакуумно-дуговое напыление пленки титана сопровождается формированием многослойной системы, электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения которой приведено на рисунке 5. Отчетливо выявляется собственно пленка титана (слой 1), переходный слой (слой 2), плавно переходящий в слой алюминия (подложка, слой 3). Методами микрорентгеноспектрального анализа выявлено (рис. 6), что переходный слой обогащен атомами кремния и содержит атомы титана и алюминия (рис.6, *б, г*).

Сформированная на силумине пленка титана является нанокристаллическим многофазным столбчатым образованием (рис. 7). Размеры кристаллитов изменяются в пределах (5–7) нм. Индицирование микроэлектронограммы, полученной с напыленной пленки, выявило присутствие, кроме рефлексов α-Ti, рефлексов кремния, алюминида титана состава Al_3Ti, силицида титана состава Ti_5Si_3. Учитывая факт многофазности напыленной пленки и переходного слоя, можно констатировать наличие термодиффузионных процессов, имеющих место при напылении пленки титана на силумин.

На рисунках 8 и 9 приведены результаты исследования (исследования осуществляли контактным нанопрофилометром) шероховатости поверхности лопаток из сплава АК5М2 до (рис. 8) и после (рис. 9) нанесения покрытий титана толщиной 5 мкм.

Установлено, что средняя по трем дорожкам испытаний величина шероховатости образцов силумина до напыления пленки титана Rz = 1,21 мкм; Ra = 0,147 мкм; после напыления пленки титана толщиной 5 мкм Rz = 0,360 мкм; Ra = 0,056 мкм. Анализируя результаты выполненных исследований, можно заключить, что шероховатость Ra поверхности лопаток сплава АК5М2 после напыления пленки титана толщиной 5 мкм снижается в

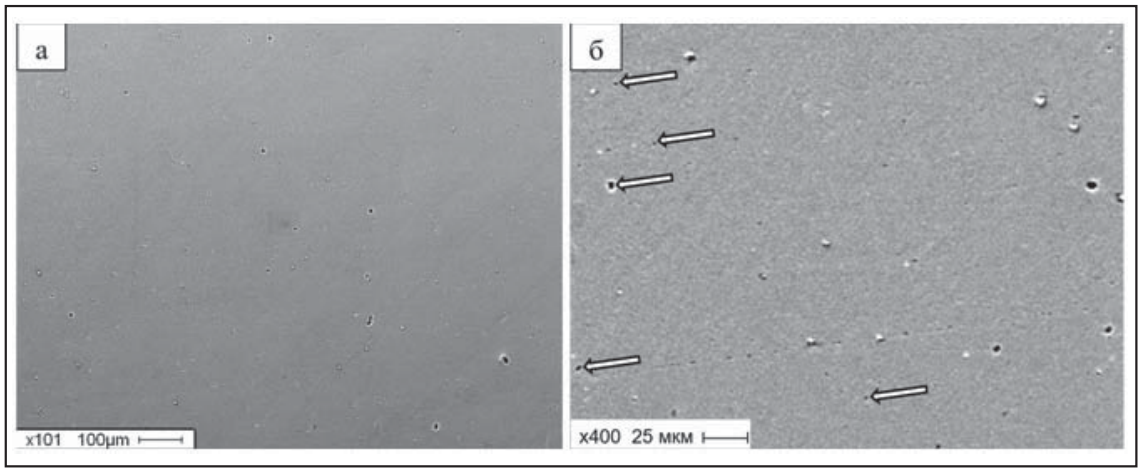

Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образца силумина марки АК5М2 с напыленной пленкой титана. На (б) стрелками указаны микрокапли

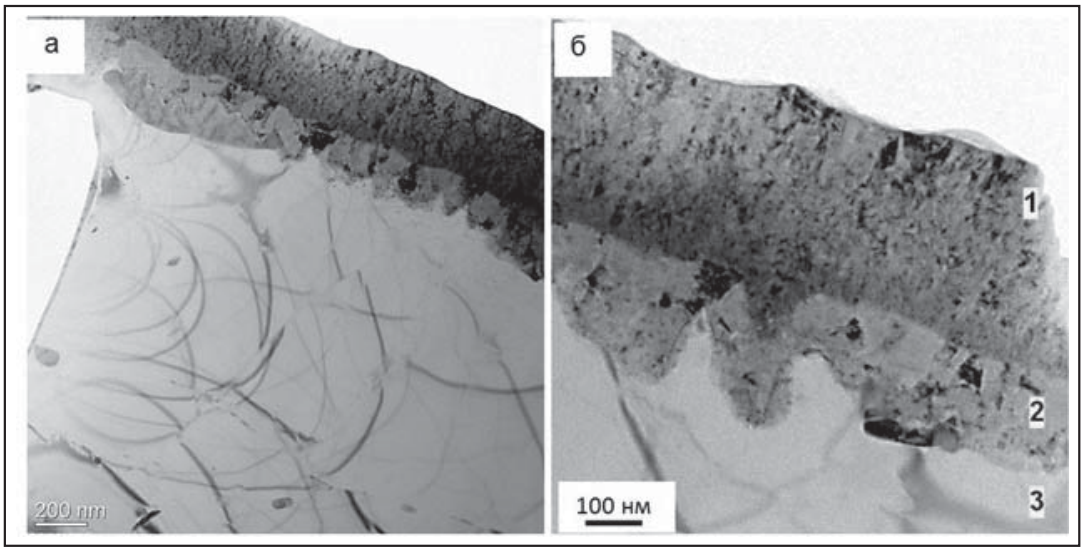

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина с напыленной пленкой титана: 1 – собственно пленка титана; 2 – переходный слой; 3 – алюминий (подложка)

2,6 раза по отношению к шероховатости лопаток силумина до напыления пленки титана.

В процессе механических испытаний, путем одноосного растяжения были разрушены образцы сплава АК5М2 в литом состоянии и образцы сплава АК5М2 поверхностно модифицированного Ti. Предел прочности системы пленка «(Ti)/ (АК5М2) подложка» составил 155,3 МПа, что на 31,2 % больше по сравнению с литым состоянием. В литом состоянии при одноосном растяжении образца силумина АК5М2 предел текучести был равен 28,91 МПа, при разрушении композитного материала системы пленка «(Ti)/ (АК5М2) подложка» предел текучести равен 21,5 МПа.

В результате исследований установлено, что в литом состоянии сплав АК5М2, подвергнутый испытаниям в условиях многоцикловой усталости, разрушается в среднем через 113427±13289 циклов после приложения ассиметричной нагрузки с частотой ~3,8 циклов/с. Максимальное значение числа циклов до разрушения, которое выдержал образец сплава АК5М2 в исходном состоянии – 165454 циклов. Формирование на поверхности образцов системы пленка «(Ti)/ (АК5М2) подложка» приводит к немонотонному изменению усталостной долговечности сплава.

Выводы

В заключении можно отметить, что разностороннее изучение характеристик упрочненного сплава АК5М2 методами современного физического материаловедения выявило значительные преобразования, как качественные, так и количественные.

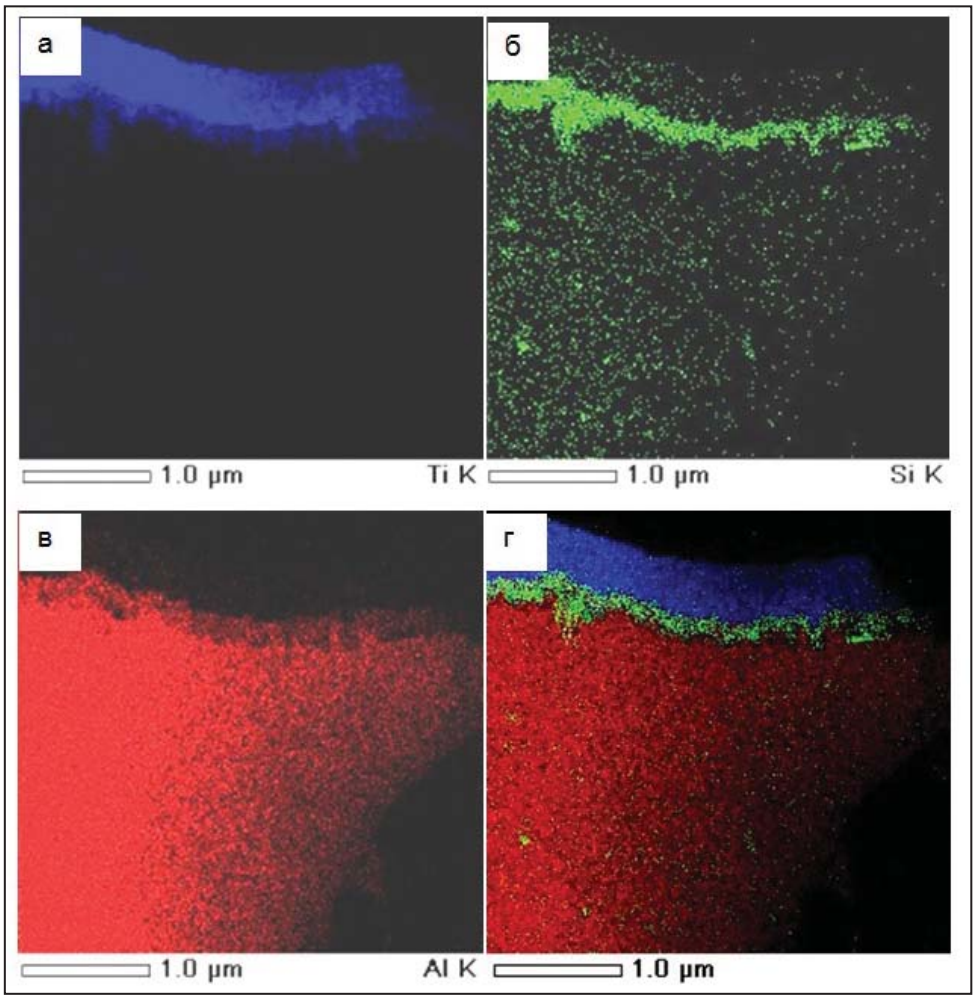

Рис. 6. Изображения поверхностного слоя силумина с напыленной пленкой титана, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Ti (а), Si (б) и Al (в); г – изображение, полученное путем наложения изображений (а-в)

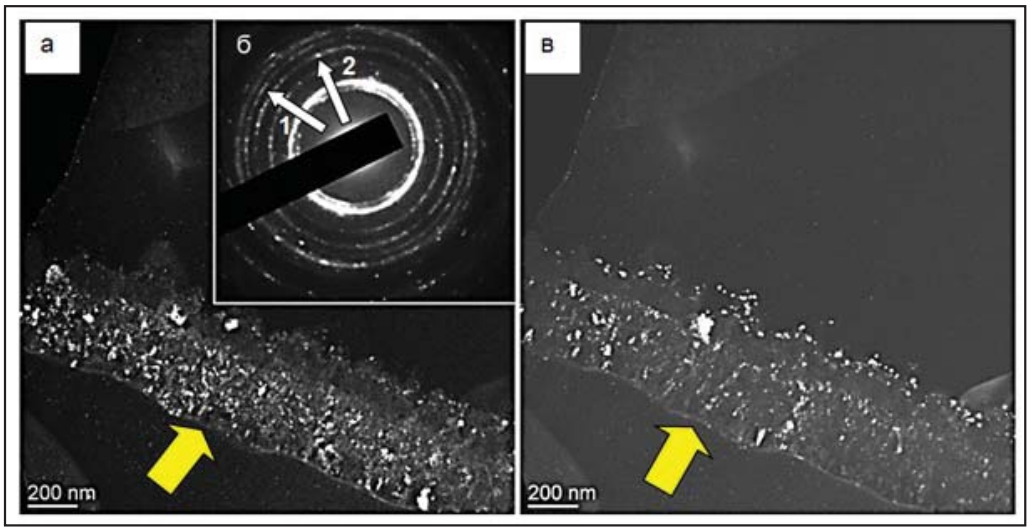

Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя силумина с напыленной пленкой титана: а – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах [100]α-Ti + [211]Si + [211]Al_3Ti, б – микроэлектронограмма, в – темное поле, полученное в близко расположенных рефлексах [100]Ti_5Si_3 + [211]Si; на (б) стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – для (а), 2 – для (в); на (а) и (в) стрелками указана поверхность пленки

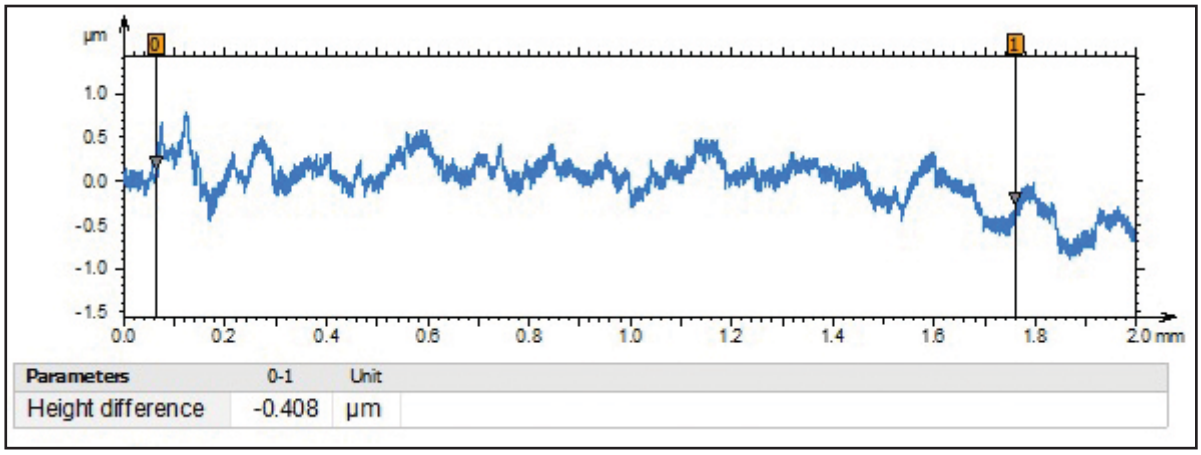

Рис. 8. Определение шероховатости образца сплава АК5М2 в исходном состоянии (Rz 0.837 µm Gaussian filter, 0.8 mm; Ra 0.123 µm Gaussian filter, 0.8 mm)

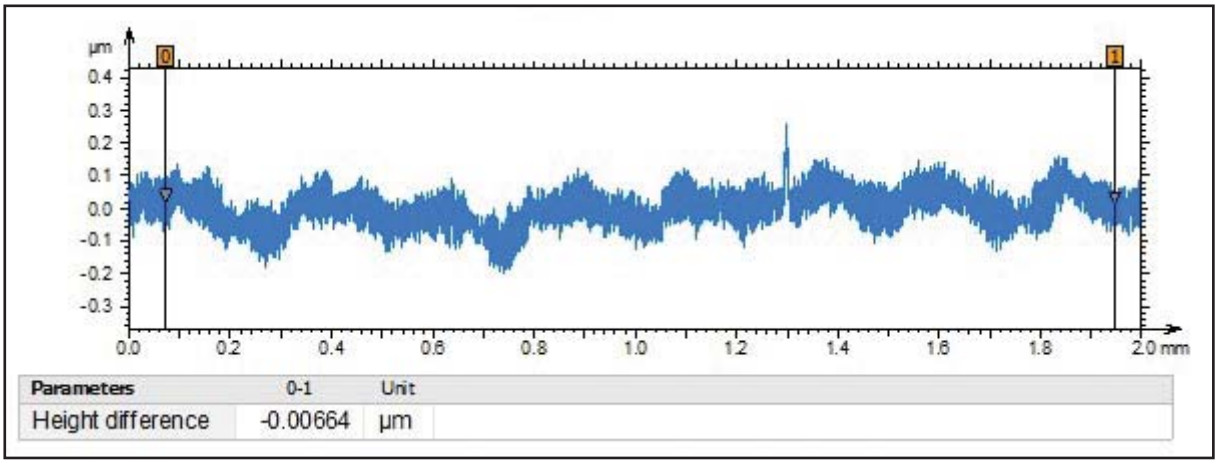

Рис. 9. Определение шероховатости образца сплава АК5М2 после напыления пленки титана толщиной 5 мкм (Rz 0.289 µm Gaussian filter, 0.8 mm; Ra 0.0396 µm Gaussian filter, 0.8 mm)

1. В процессе механических испытаний, были получены значения предела прочности, предела текучести. Предел прочности системы пленка «(Ti)/ (АК5М2) подложка» составил 155,3 МПа, что на 31,2 % больше по сравнению с литым состоянием. В литом состоянии при одноосном растяжении образца силумина АК5М2 предел текучести был равен 28,91 МПа, при разрушении композитного материала системы пленка «(Ti)/ (АК5М2) подложка» предел текучести равен 21,5 МПа. Снижение предела текучести сплава предположительно связано с изменениями его структурных свойств в результате формирование системы. 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 временно постоянстве растягивающего усилия.

2. В результате исследований сплава АК5М2, в процессе испытаний в условиях многоцикловой усталости выявлено, что величина циклов до разрушения немонотонно зависит от размера напыленного слоя титановой пленки. При толщине пленки 1 мкм практически не наблюдается изменений, образцы в среднем выдерживают 112813±10144 циклов знакопеременной нагрузки при частоте ~3,5 циклов/с. Увеличение толщины пленки Ti до 3 и 5 мкм, наблюдается кратное увеличение усталостной долговечности 213434±44468 225685±22795, соответственно, частота приложения ассиметричной нагрузки ~3,6 циклов/с. Таким образом, изменение в процентном отношении составляет 1 мкм – (–0,5 %); 3 мкм – (88 %); 5 мкм – (99 %).

3. Анализ изображений, полученных сканирующей электронной микроскопией показал, что вакуумно-дуговое напыление пленки титана сопровождается формированием многослойной

системы, электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения. Отчетливо выявляется собственно пленка титана (слой 1), переходный слой (слой 2), плавно переходящий в слой алюминия (подложка, слой 3).

4. Микрорентгеноспектральный анализ выявил, что переходный слой обогащен атомами кремния и содержит атомы титана и алюминия. Индицирование микроэлектронограммы, полученной с напыленной пленки, выявило присутствие, кроме рефлексов α-Ti, рефлексов кремния, алюминида титана состава Al_3Ti, силицида титана состава Ti_5Si_3. Данные микрорентгеноспектрального анализа выявили наличие термодиффузионных процессов, происходящих при напылении пленки титана на силумин. Это позволило сформировать модифицированный поверхностный слой, характеризующийся отсутствием микропор и микротрещин. Сильно развитый рельеф границы переходного слоя указывает на высокий уровень адгезии сформированной системы «пленка (Ti)/(АК5М2) подложка».

5. Исследования шероховатости напыленной поверхности, на основании которых установлено, что шероховатость Ra поверхности лопаток сплава АК5М2 после напыления пленки титана толщиной 5 мкм снижается в 2,6 раза по отношению к шероховатости лопаток силумина до напыления пленки титана.

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"

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otani B. *Silumin and its structure*. J. Inst. Met. 2021. 36 p.
2. *ГОСТ Р 55375 - 2012 Алюминий первичный и сплавы на его основе*. Марки. М.: Стандартинформ, 2013. 21 с.
3. Marukovich E., Stetsenko V. *Litiyo i Metallurgiya*. 2018. Pp. 12–15.
4. Anantha Padmanaban D., Kurien G. *Advanced Materials and Processes*. 2012. 170. Pp. 28–30.
5. Goenka M., Nihal Ch., Ramanathan R., Gupta P., Parashar A., Joel J. *Materials Today: Proceedings*. № 22. Pp. 2525–2531.
6. Javidani M., Larouche D. *International Materials Reviews*. 2014. Vol. 59. N. 3. Pp. 132–158.
7. Robles-Hernández F., Herrera Ramirez J. *Al-Si Alloys - R*. 2017 10.1007/978-3-319-58380-8.8
8. Гончаров В.С. *Методы упрочнения конструкционных материалов. Функциональные покрытия*. 2017.
9. Селиверстов И.А., Русанов С.А., Смирнов И.В. Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок релита wcw2c // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. Т. 1. № 8(49). С. 55–58.
10. Твердохлебов С.И. Гибридные материалы для биомедицинских применений // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 12-3. С. 38–43.
11. Шаронов Е.А., Ванновский В.В., Алексеев С.В. Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок керамики SiO_2 - FeOn // *Труды 6-й междунар. Конференции «Пленки и покрытия - 2001»*. СПб: Изд. СПбГТУ. 2001. С. 146–149.
12. Дин Кай Цзянь. Исследование состава и структуры оболочечных конструкций из слоистых металлокомпозитов с защитным покрытием // *Машиностроитель*. 2014. № 3. С. 20–23.
13. Ленковец А.С., Лозован А.А., Моргунов С.В. Дервук В.В., Якушин А.Ф. Получение и исследование слоистого металлокомпозита 12Х18Н10Т-TiN методом вакуумно-дугового осаждения // *Тр. 8-й Всеросс. с междунар. участием научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия»*. 30 ноября – 1 декабря 2009 г. «МАТИ» РГТУ им. К.Э.Циолковского: Сб. трудов. М.:МАТИ, 2009. С. 219–294.
14. Ли Ц. Исследование свойств покрытия TiO_2 на образцах из титанового сплава ВТ1-0 // *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах, Томск, 26–29 апреля 2016 года*. Том 1. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. С. 151–153.
15. Валиев Р.Р., Дыбленко Ю.М., Ганеев А.В., Жернаков В.С. Микроструктура и поведение покрытий из TiN на лопатках ГТД, изготовленных из титанового УМЗ сплава ВТ-6 // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2011. Т. 15. № 4(44). С. 63–66.
16. Рахманкулов М.М. *Металлургия стратегических металлов и сплавов*. М.: Теплотехник, 2008. 504 с.
17. Антонюк О.В. Нитрид-титановое покрытие поршней // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–30 мая 2015 года* / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский

государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 1198–1202.
18. Павлова Т.В., Павлова Л.А., Павлов И.А. Реакции живых клеток и тканей на имплантацию титаново-алюминиево-ванадиевого сплавов // *Системный анализ и управление в биомедицинских системах*. 2007. № 2. Т. 6. С. 364–365.
19. Капустин Р.Ф., Абраменко Л.И., Гончаров И.Ю. Физико-химическая экспертиза качества нитрид-титановых покрытий, используемых в пищевой промышленности // *Актуальные проблемы развития общественного питания и пищевой промышленности: Материалы международной научно-практической и научно-методической конференции, Белгород, 28 марта 2018 года*. Белгород: Белгородский университет кооперации, экономики и права, 2018. С. 35–38.
20. X. Qian *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics (ASM TECHNICAL BOOKS)*, 2012.
21. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys* / ed. ed. N.N. Koval and Yu.F. Ivanova. Tomsk: NTL Publishing House, 2016. 312 p.
22. Inkson B.J. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* / K. Dos Santos (Ed.). Elsevier Ltd, 2016. Pp. 17–43.
23. Primig S., Theska F., Haghdadi N. *Electron Microscopy Methods*. 2020 10.1016/ B978-0-12-819726-4.00031-4.
24. Kuo J. *Electron Microscopy: Methods and Protocols*. 2014. 10.1007/978-1-62703-776-1

REFERENCES

1. Otani B. *Silumin and its structure*. J. Inst. Met. 2021. 36 p.
2. *GOST R 55375 - 2012 Alyuminij pervichnyj i splavy na ego osnove* [GOST R 55375 - 2012 Primary aluminum and alloys based on it. Marks]. M.: Standartinform, 2013. 21 p.
3. Marukovich E., Stetsenko V. *Litiyo i Metallurgiya*. 2018. Pp. 12–15.
4. Anantha Padmanaban D., Kurien G. *Advanced Materials and Processes*. 2012. 170. Pp. 28–30.
5. Goenka M., Nihal Ch., Ramanathan R., Gupta P., Parashar A., Joel J. *Materials Today: Proceedings*. № 22. Pp. 2525–2531.
6. Javidani M., Larouche D. *International Materials Reviews*. 2014. Vol. 59. N. 3. Pp. 132–158.
7. Robles-Hernández F., Herrera Ramirez J. *Al-Si Alloys - R*. 2017 10.1007/978-3-319-58380-8.8
8. Goncharov V.S. *Metody uprochneniya konstrukcionnyh materialov. Funkcional'nye pokrytiya* [Methods for hardening structural materials. functional coatings]. 2017.
9. Seliverstov I.A., Rusanov S.A., Smirnov I.V. Vakuumno-dugovoe napylenie medi na poroshok relita wcw2c [Vacuum arc deposition of copper on wcw2c relit powder]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij* [Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2011. Vol. 1. No. 8(49). Pp. 55–58.
10. Tverdohlebov S.I. Gibridnye materialy dlya biomedicinskih primenenij [Hybrid materials for biomedical applications]. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Izvestiya vuzov. Physics]. 2013. Vol. 56. No. 12-3. Pp. 38–43.
11. SHaronov E.A., Vannovskij V.V., Alekseev S.V. Vakuumno-dugovoe napylenie medi na poroshok keramiki SiO_2 - FeOn [Vacuum arc deposition of copper on ceramic powder SiO_2 - FeOn]. Tr*udy 6-j mezhdunar. Konferencii «Plenki i pokrytiya - 2001»* [Proceedings of the 6th Intern. Conference "Films and Coatings - 2001"]. St. Petersburg: Ed. SPbGTU. 2001. Pp. 146–149.
12. Din Kaj Czyan'. Issledovanie sostava i struktury obolochechnyh konstrukcij iz sloistyh metallokompozitov c zashchitnym pokrytiem [Investigation of the composition and structure of shell structures from layered metal composites with a protective coating]. *Mashinostroitel'* [Mashinostroitel]. 2014. No. 3. Pp. 20–23.
13. Lenkovec A.S., Lozovan A.A., Morgunov S.V. Dervuk V.V., Yakushin A.F. Poluchenie i issledovanie sloistogo metallokompozita 12H18N10T-TiN metodom vakuumno-dugovogo osazhdeniya [Preparation and study of layered metal composite 12Kh18N10T-TiN by vacuum-arc deposition]. *Tr. 8-j Vseross. s mezhdunar. uchastiem nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Bystrozakalyonnye materialy i pokrytiya». 30 noyabrya – 1 dekabrya 2009 g.* [Tr. 8th All-Russian. with international participation in the scientific and technical conference "Quickly hardened materials and coatings". November 30 - December 1, 2009]. "MATI" RGTU. K.E. Tsiolkovsky: Sat. works. M.: MATI, 2009. Pp. 219–294.
14. Li C. Issledovanie svojstv pokrytiya TiO_2 na obrazcah iz titanovogo splava VT1-0 [Study of the properties of the TiO_2 coating on samples of titanium alloy VT1-0]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nyh nauk: sbornik nauchnyh trudov XIII Mezhdunarodnoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: v 7 tomah, Tomsk, 26–29 aprelya 2016 goda.* Tom 1 [Prospects for the development of fundamental sciences: a collection of scientific papers of the XIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists: in 7 volumes, Tomsk, April 26–29, 2016.

Vol. 1]. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2016. Pp. 151–153.
15. Valiev R.R., Dyblenko YU.M., Ganeev A.V., ZHernakov V.S. Mikrostruktura i povedenie pokrytij iz TiN na lopatkah GTD, izgotovlennyh iz titanovogo UMZ splava VT-6 [Microstructure and behavior of TiN coatings on GTE blades made from titanium UFG alloy VT-6]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University]. 2011. Vol. 15. No. 4(44). Pp. 63–66.
16. Rahmankulov MM. *Metallurgiya strategicheskih metallov i splavov* [Metallurgy of strategic metals and alloys]. M.: Teplotechnik, 2008. 504 p.
17. Antonyuk O.V. Nitrid-titanovoe pokrytie porshnej [Titanium nitride coating of pistons]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V.G. Shuhova, Belgorod, 01–30 maya 2015 goda* [International scientific and technical conference of young scientists of BSTU. V.G. Shukhov, Belgorod, May 01–30, 2015]. Belgorod State Technological University named after V.I. V.G. Shukhov. Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova, 2015. Pp. 1198–1202.
18. Pavlova T.V., Pavlova L.A., Pavlov I.A. Reakcii zhivyh kletok i tkanej na implantaciyu titanovo-alyuminievo-vanadievogo splavov [Reactions of living cells and tissues to the implantation of titanium-aluminum-vanadium alloys]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah* [System analysis and management in biomedical systems]. 2007. No. 2. Vol. 6. Pp. 364–365.
19. Kapustin R.F., Abramenko L.I., Goncharov I.YU. Fiziko-himicheskaya ekspertiza kachestva nitrid-titanovyh pokrytij, ispol'zuemyh v pishchevoj promyshlennosti [Physical and chemical examination of the quality of titanium nitride coatings used in the food industry]. *Aktual'nye problemy razvitiya obshchestvennogo pitaniya i pishchevoj promyshlennosti: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj i nauchno-metodicheskoj konferencii, Belgorod, 28 marta 2018 goda* [Actual problems of the development of public catering and the food industry: Proceedings of the international scientific-practical and scientific-methodological conference, Belgorod, March 28, 2018]. Belgorod: Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 2018. Pp. 35–38.
20. X. Qian *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics (ASM TECHNICAL BOOKS)*, 2012.
21. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys* / ed. ed. N.N. Koval and Yu.F. Ivanova. Tomsk: NTL Publishing House, 2016. 312 p.
22. Inkson B.J. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* / K. Dos Santos (Ed.). Elsevier Ltd, 2016. Pp. 17–43.
23. Primig S., Theska F., Haghdadi N. *Electron Microscopy Methods*. 2020 10.1016/B978-0-12-819726-4.00031-4.
24. Kuo J. *Electron Microscopy: Methods and Protocols*. 2014. 10.1007/978-1-62703-776-1

Сведения об авторах

[1] ***Шляров Виталий Владиславович,*** *аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля*

[1] ***Серебрякова Анна Александровна,*** *аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля*

[1] ***Загуляев Дмитрий Валерьевич,*** *доктор техн. наук, заместитель начальника УНИ*

[2] ***Иванов Юрий Федорович,*** *доктор физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники*

[3] ***Устинов Артем Михайлович,*** *канд. техн. наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций*

[1] *Сибирский государственный индустриальный университет*

654007, г. Новокузнецк, Российская Федерация, ул. Кирова, д. 42

[2] *Институт сильноточной электроники Сибирское отделение Российской академии наук*

634055, г. Томск, Российская Федерация, Академический просп., 2/3

[3] *Томский государственный архитектурно-строительный университет*

634003, г. Томск, Российская Федерация, Соляная площадь, 2

Information about authors

[1] ***Shlyarov Vitalii V.,*** *Post-graduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel*

[1] ***Serebryakova Anna A.,*** *Post-graduate student of the Department of Natural Sciences n.a. Professor V.M. Finkel*

[1] ***Zaguliaev Dmitrii V.,*** *Doctor of Technical Sciences, Deputy head of UNI*

[2] ***Ivanov Yuriy F.,*** *Doctor of Physics and Mathematics. Sci., Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics*

[3] ***Ustinov Artem M.,*** *Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures*

Siberian State Industrial University. 654007, Novokuznetsk, Russian Federation, st. Kirov, 42

[2] *Institute of High Current Electronics SB RAS. 634055, Tomsk, Russian Federation, Akademicheskij prosp., 2/3*

[3] *Tomsk State University of Architecture and Building. 634003, Tomsk, Russian Federation, Solyanaya ploshchad', 2*