



Обзорная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК: 620.187:669.2/7

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.013



EDN: HSGFBY

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ СИСТЕМ Al–Si, Mn–Fe–Co МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Юлия Андреевна Шлярова¹, Виталий Владиславович Шляров²,
Ирина Алексеевна Панченко³, Сергей Валерьевич Коновалов⁴,
Роман Анатольевич Филиппев⁵

^{1, 2, 3, 4} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

⁵ Kuzbass Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia

¹ rubannikova962mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

² shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

⁵ Filipiev@live.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8165-0141>

Аннотация. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) относится к числу широко распространенных современных микроскопических методик, предназначенных для получения визуальной информации о микростроении твердофазных объектов (сплавов, металлов и т.д.). В работе приведены области применения сканирующего электронного микроскопа (полупроводники; биология и медицина; химическая, нефтехимическая, горнодобывающая промышленность; научно-исследовательские лаборатории). Проведены примеры анализа различных структур материалов (высокоэнтропийный сплав, силумин, структура изломов алюминиевого сплава А5М), полученных с помощью метода сканирующего электронного микроскопа. Показано, что в микроструктуре высокоэнтропийного сплава системы Mn–Fe–Co–Cr–Ni присутствуют округлые поры ($1,3 \pm 0,1$ мкм). Причиной образования пор может быть специфика технологии проволоочно-дугового аддитивного производства. Структура силумина системы Al–10 % Si демонстрирует многофазный, морфологически разнообразный характер. Облучение электронным пучком силумина сопровождается плавлением алюминия вдоль поверхностей раздела с включениями второй фазы. Излом образца алюминия А5М, разрушенного в условиях усталости, имеет пепельно-серый цвет и сильно шероховатую матовую поверхность. В результате исследований деформационных характеристик технически чистого алюминия А5М было установлено, что образцы технически чистого алюминия в исходном состоянии достигают критической деформации и разрушаются в среднем при 18742 ± 654 циклов. Применение магнитного поля 0,1 Тл постоянной геометрии приводит к увеличению количества циклов до разрушения на 36,8 %, в среднем образцы разрушаются при 25207 ± 2349 циклов.

Ключевые слова: сканирующий электронный микроскоп, силумин, высокоэнтропийный сплав, структура, поверхность, анализ, излом.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013).

Для цитирования: Исследование структуры сплавов систем Al–Si, Mn–Fe–Co методами сканирующей электронной микроскопии / Шлярова Ю. А. [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 99–108. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.013. EDN: <https://elibrary.ru/HSGFBY>.

STUDY OF THE STRUCTURE OF Al-Si, Mn-Fe-Co ALLOYS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Yulia A. Shliarova¹, Vitaly V. Shlyarov², Irina A. Panchenko³,
Sergey V. Konovalov⁴, Roman A. Filipiev⁵

^{1, 2, 3, 4} Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

¹ rubannikova962@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5677-1427>

² shlyarov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8130-648X>

³ i.r.i.ss@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

⁴ konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

Abstract. Scanning electron microscopy (SEM) is one of the widely used modern microscopic techniques designed to obtain visual information about the microstructure of solid-phase objects (alloys, metals, etc.). The paper presents the areas of application of a scanning electron microscope (semiconductors; biology and medicine; chemical, petrochemical, mining industries; research laboratories). Examples of analysis of various structures of materials (high-entropy alloy, silumin, fracture structure of A5M aluminum alloy) obtained using the scanning electron microscope method are given. It is shown that rounded pores ($1.3 \pm 0.1 \mu\text{m}$) are present in the microstructure of the high-entropy alloy of the Mn-Fe-Co-Cr-Ni system. The reason for the formation of pores may be the specifics of the wire-arc additive manufacturing technology. The structure of the silumin of the AL-10 %Si system demonstrates a multiphase, morphologically diverse character. Irradiation with an electron beam of silumin is accompanied by melting of aluminum along the interfaces with inclusions of the second phase. The fracture of an A5M aluminum sample destroyed under fatigue conditions has an ash-gray color and a highly rough matte surface. As a result of studying the deformation characteristics of commercially pure A5M aluminum, it was found that samples of commercially pure aluminum in the initial state reach critical deformation and fail on average at 18742 ± 654 cycles. The use of a magnetic field of 0.1 T of constant geometry leads to an increase in the number of cycles to failure by 36.8 %, on average, the samples are destroyed at 25207 ± 2349 cycles.

Keywords: scanning electron microscope, silumin, high-entropy alloy, structure, surface, analysis, fracture.

Acknowledgements: The research was supported by the framework of the state assignment (subject code 0809-2021-0013).

For citation: Shliarova, Yu. A., Shlyarov, V. V., Panchenko, I. A. & Konovalov, S. V. (2022). Study of the structure of Al-Si and Mn-Fe-Co alloys by scanning electron microscopy. *Polzunovskiy vestnik*, 4(2), 99-108. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.013. EDN: <https://elibrary.ru/HSGFBY>.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря быстрому развитию современных методов визуализации материаловеды могут наблюдать и правильно анализировать явления, происходящие в микрометровом масштабе [1]. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) является одной из широко используемых систем визуализации в материаловедении и технике [2, 3]. Данная технология была запатентована в 1931 г. Р. Руденбергом, который создал первый в мире электронный микроскоп. Сегодня – это один из наиболее эффективных и передовых методов исследования, который широко используется на предприятиях, в научных, учебных лабораториях. СЭМ характеризует морфологию, кристаллическую структуру и химический состав образца путем сканирования его поверх-

ности сфокусированным пучком электронов. При взаимодействии луча с атомами внутри образца испускаются различные сигналы, включая вторичные электроны, обратно рассеянные электроны, фотоны и рентгеновские лучи. Вторичные электроны чаще всего используются системой СЭМ для получения морфологических изображений материалов с высоким пространственным разрешением.

Стоит отметить, что СЭМ сыграла решающую роль не только в материаловедении, но и в развитии информационных технологий [4], в частности заслуги СЭМ относят к применению анализа данных. При анализе взаимосвязи между материальным процессом и структурой изображения СЭМ использовались для извлечения низкоразмерных проектных переменных для получения набо-

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ СИСТЕМ Al–Si, Mn–Fe–Co МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

ра параметров расчетного процесса с использованием генеративных нейронных сетей [5–7]. Данная технология также широко применяется при анализе взаимосвязи между структурой и свойствами материалов и для прогнозирования их свойств [8–11].

Существуют два основных направления электронной микроскопии: растровая (сканирующая) и трансмиссионная (просвечивающая). Данные направления базируются на использовании соответствующих типов электронных микроскопов.

В растровых электронных микроскопах (РЭМ) электронный луч, сжатый магнитными линзами в тонкий (1–10 нм) зонд, сканирует поверхность образца, формируя на ней растр из нескольких тысяч параллельных линий. Возникающие при электронной бомбардировке поверхности вторичные излучения (вторичная эмиссия электронов, оже-электронная эмиссия и др.) регистрируются различными детекторами и преобразуются в видеосигналы, модулирующие электронный луч в ЭЛТ. Развертки лучей в колонне РЭМ и в ЭЛТ синхронны, поэтому на экране ЭЛТ появляется изображение, представляющее собой картину распределения интенсивности одного из вторичных излучений по сканируемой площади объекта. Увеличение РЭМ определяется как $M = L/l$, где L и l – длины линий сканирования на экране ЭЛТ и на поверхности образца.

Трансмиссионная микроскопия реализуется с помощью трансмиссионных (просвечивающих) электронных микроскопов (ТЭМ), в которых тонкопленочный объект просвечивается пучком ускоренных электронов с энергией 50–200 кэВ. Электроны, отклоненные атомами объекта на малые углы и прошедшие сквозь него с небольшими энергетическими потерями, попадают в систему магнитных линз, которые формируют на люминесцентном экране (и на фотопленке) светлосильное изображение внутренней структуры. При этом удается достичь разрешения порядка 0,1 нм, что соответствует увеличениям до $1,5 \times 10^6$ раз. Рассеянные электроны задерживаются диафрагмами, от диаметра которых в значительной степени зависит контраст изображения. При изучении сильнорассеивающих объектов более информативны темнопольные изображения.

Технология электронной микроскопии постоянно развивается:

- 1) совершенствуются способы подготовки образцов;
- 2) разрабатываются методики для получения более качественной и широкой информации;
- 3) улучшается электронная оптика;
- 4) повышается чувствительность методов анализа применением спектрометрических систем;

5) разрабатываются методики компьютерной обработки изображений с целью получения более широкой информации о структуре;

6) тестируются методы компьютеризации, автоматизации путем подключения к микроскопу дополнительной аппаратуры и пр.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Метод электронной микроскопии используется для изучения поверхности объектов, ультратонких срезов тканей, микробов. С его помощью определяют строение жгутиков, вирусов и пр. Оборудование, основанное на этой технологии, широко используется в различных научных и производственных отраслях:

1. Полупроводники, хранение данных. Выполняется анализ дефектов, трехмерная метрология, определяются неисправности, редактируются рабочие схемы.

2. Биология и медицина. Электронные микроскопы применяют в криобиологии, электронной и клеточной томографии, вирусологии, стекловании. С их помощью определяют локализацию белков, анализируют частички, выполняют фармацевтический контроль качества, получают трехмерные изображения тканей.

3. Промышленности. Электронные микроскопы позволяют снимать плоские и трехмерные микрохарактеристики, параметры частиц, проводить динамические эксперименты с материалами, получения изображения высокого разрешения. Они применяются в химической, нефтехимической горнодобывающей отрасли, микро-технологии, судебной медицине и пр.

4. Научно-исследовательские лаборатории. Электронная микроскопия позволяет делать квалификацию материалов, создавать нанопрототипы, исследовать микроструктуры металлов, подбирать материалы и образцы. Микроскопы также применяются для тестирования и снятия характеристик.

Целью настоящей статьи является анализ результатов исследования структуры металлов и сплавов методами сканирующей электронной микроскопии.

СЭМ-АНАЛИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Al–Co–Cr–Fe–Ni

В последние два десятилетия внимание исследователей в области физического материаловедения привлечено к исследованию структуры, свойств, методов получения и стабильности так называемых высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [12, 13], содержащих не менее 5 основных элементов. Такой интерес обусловлен уникальными физико-механическими свойствами ВЭС (коррозионной и износостойкостью, жаро- и криопрочностью, особыми маг-

нитными и электрическими свойствами и т.д.), что делает их перспективными для различных областей использования [14–19].

В работе использовался высокоэнтропийный сплав Mn–Fe–Co–Cr–Ni следующего химического состава: Co – 25,2 ат. %, Cr – 15,1 ат. %, Fe – 37,8 ат. %, Mn – 3,4 ат. %, Ni – 16,3 ат. %, Al – 0,8 ат. %, Si – 1,4 ат. %

Диаметр комбинированной проволоки Mn–Fe–Co–Cr–Ni составил $\approx 1,2$ мм, с длиной укладки 10 мм. Образцы были получены послойным нанесением на подложку из стали с помощью плавления проволоки в атмосфере инертного газа (Ar = 99,99 %).

Методами сканирующей электронной микроскопии получено изображение структуры образцов высокоэнтропийного сплава Mn–Fe–Co–Cr–Ni.

Анализ изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии, демонстрирует наличие округлых пор ($1,3 \pm 0,1$ мкм) в микроструктуре сплава (рисунок 1, а). Причиной образования пор может быть специфика технологии проволоочно-дугового аддитивного производства. Поры, имеющие форму сфер, образуются из газов, которые попадают в ванну расплава из-за быстрой кристаллизации нанесенного слоя [20–23].

Несмотря на то, что полученный высокоэнтропийный сплав имеет неэквимолярное соотношение элементов, среди которых Fe и Co являются преобладающими и их относительное содержание в сумме составляет ≈ 65 ат. %, картирование показало однородное распределение химических элементов (рисунок 1, б–е).

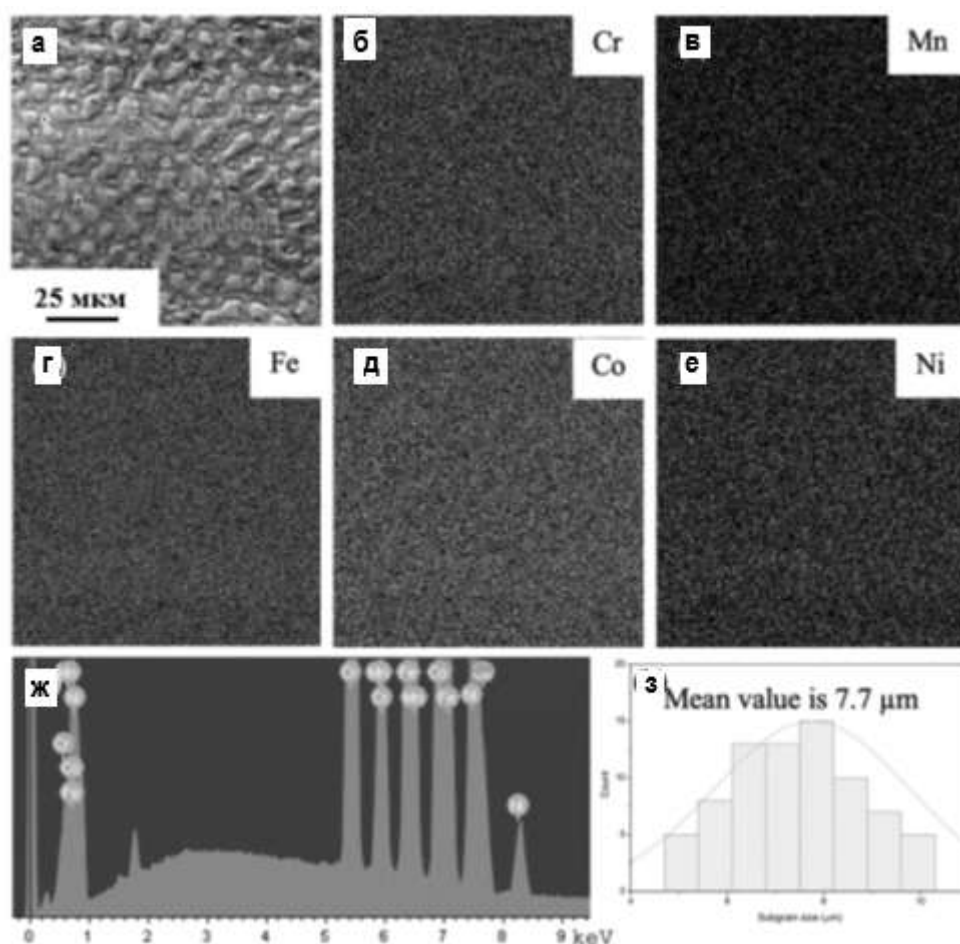


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения дендритной структуры высокоэнтропийного сплава системы Mn–Fe–Co–Cr–Ni, изготовленного с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства; (б)–(е) – изображение структуры участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Cr (б), Mn (в), Fe (г), Co (д), Ni (е); (ж) – энергетические спектры участка (а); (з) – гистограмма поперечного сечения дендритных зерен

Figure 1 - A cross section of a dendritic structure of the Mn–Fe–Co–Cr–Ni - system high-entropy alloy (a) fabricated by wire-arc additive manufacturing; b-f - a structure of the portion (a) obtained in a characteristic X-ray radiation of Cr(b), Mn(c), Fe(d), Co(e), Ni(f) atoms; (g) - characteristic spectra of the portion; h - a histogram of the cross-section of dendritic grains

СЭМ-АНАЛИЗ AL-SI СПЛАВОВ

Сплавы алюминия с кремнием (силумины) сравнимы по прочностным и коррозионным свойствам с нержавеющей сталью, однако они легче ее, что, несомненно, является плюсом. Прочностные свойства сплава обеспечиваются кремнием, входящим в его состав, а коррозионная стойкость гарантируется образованием защитной оксидной пленки, возникающей на поверхности в окислительных средах, одной из которых является кислород. Выигрывает сплав и по пластичности, он легко повторяет самые сложные формы, заполняя их равномерно. В итоге литье сплава упрощается, а значит, и удешевляется процесс производства [24–26].

Силумин системы Al-10 % Si, являющийся материалом исследования настоящей работы, содержит медь, магний, железо, никель и некоторые другие легирующие элементы. Наличие легирующих элементов способствует, с одной стороны, повышению прочности, а с другой стороны, приводит к снижению трещиностойкости, что обусловлено формированием интерметаллидов пластинчатой морфологии. Характерные изображения структуры травленого шлифа, полученные методами сканирующей электронной микроскопии и демонстрирующие многофазный, морфологически разнообразный характер материала, представлены на рисунке 3 [27].

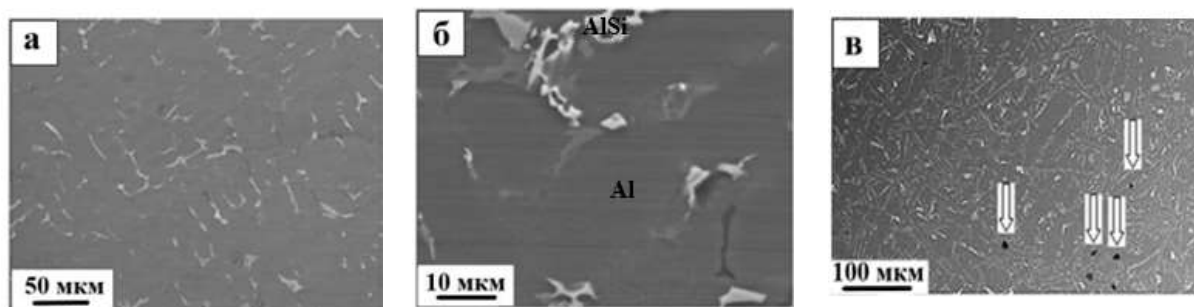


Рисунок 3 – Структура сплава в литом состоянии (на (в) стрелками указаны микропоры).
Сканирующая электронная микроскопия

Figure 3 - The structure of the alloy in the as-cast state (arrows indicate micropores in (c)).
Scanning electron microscopy

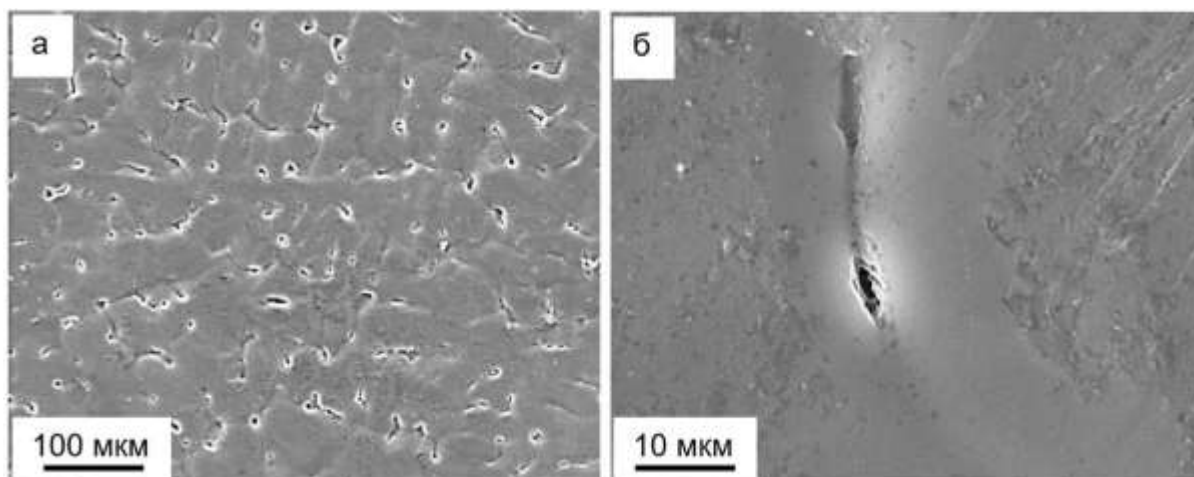


Рисунок 4 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца, подвергнутого облучению электронным пучком при плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см²

Figure 4 - Electron microscopic image of the surface structure of a sample subjected to electron beam irradiation at an electron beam energy density of 10 J/cm²

Гомогенизацию поверхностного слоя материала осуществляли, облучая поверхность образцов интенсивным импульсным электронным пучком. Облучение электронным пучком с плотностью энергии $E_s = 10 \text{ Дж/см}^2$ сопровождается плавлением алюминия вдоль поверхностей раздела с включениями второй фазы (рисунок 4). Ширина расплавленного слоя (вдоль поверхности облучения) достигает (10–15) мкм (рисунок 4, б). Причиной избирательного плавления поверхности является низкий коэффициент теплопроводности включений, что приводит к перегреву прилегающего слоя алюминия при импульсном облучении образцов. В участках образца, свободных от включения, плавление материала не наблюдается, о чем свидетельствуют царапины, оставленные при механической полировке материала (рисунок 4, б) [28, 29].

ПРИМЕНЕНИЕ СЭМ-АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИЗЛОМОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА А5М

В современных условиях эксплуатации материалов проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов выдвигаются в число основных задач. Большинство деталей и механизмов подвергаются циклическим нагрузкам, приводящим к разрушению [30]. Изучение поверхности изломов позволит выявить причины и механизмы, приводящие к разрушению, и впоследствии составить рекомендации по улучшению качества готовой продукции. В современных материаловедческих лабораториях широко применяются методы сканирующей электронной микроскопии для выявления параметров изломов [31–33].

В качестве материала исследования использовали образцы технически чистого алюминия марки А5М, химический состав которого в соответствии с ГОСТ 21631-2019 «Листы из алюминия и алюминиевых сплавов». Усталостные испытания осуществлялись по схеме циклического несимметричного консольного изгиба в условиях многоциклового усталости с частотой нагружения $3,3 \text{ с}^{-1}$ и одновременном воздействии магнитного поля 0,1 Тл. Образцы для усталостных испытаний имели форму параллелепипеда с параметрами $4 \times 12 \times 130 \text{ мм}^3$. Имитация трещины осуществлялась двумя надрезами в виде полукруглости радиусами 22 мм.

В результате исследований деформационных характеристик технически чистого алюминия А5М было установлено, что при

режиме нагружения, описанном выше, образцы технически чистого алюминия в исходном состоянии достигают критической деформации и разрушаются в среднем при 18742 ± 654 циклов. Применение магнитного поля 0,1 Тл постоянной геометрии приводит к увеличению количества циклов до разрушения на 36,8 %, в среднем образцы разрушаются при 25207 ± 2349 циклов. Данные были получены по измерениям количества циклов до разрушения по 5 образцам в каждом из двух режимов. Общий вид поверхности излома образца алюминия А5М, разрушенного в условиях усталости, приведен на рисунке 5.

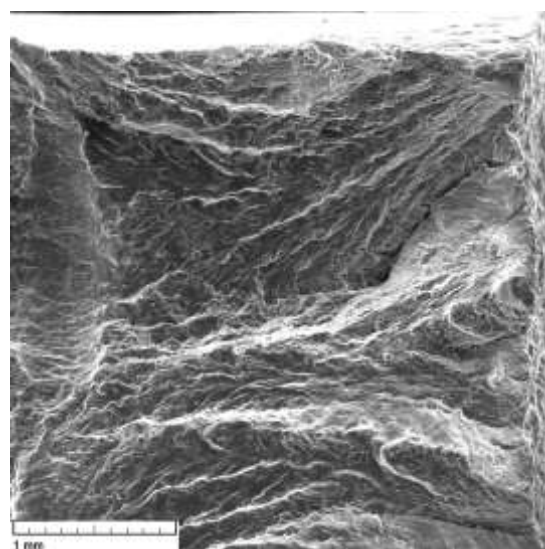


Рисунок 5 – Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца сплава А5М, разрушенного в условиях усталости

Figure 5 - Electron microscopic image of the structure of the surface of the А5М alloy sample, destroyed under fatigue conditions

Стоит отметить, что излом имеет пепельно-серый цвет и сильно шероховатую матовую поверхность. В случае усталостного разрушения сплава А5М зона стабильного роста трещины характеризуется различными элементами структуры, присущими вязкому разрушению, среди которых можно отметить элементы вытяжки и ямки отрыва. Из рисунка 6 (примеры данных зон обведены эллипсами) видно, что форма данных элементов представляет собой конгломераты столбчатой морфологии, вытянутые в направлении разрушения. Размер данных зон может зависеть от количества мест зарождения микропор и относительной пластичности матрицы материала [34].

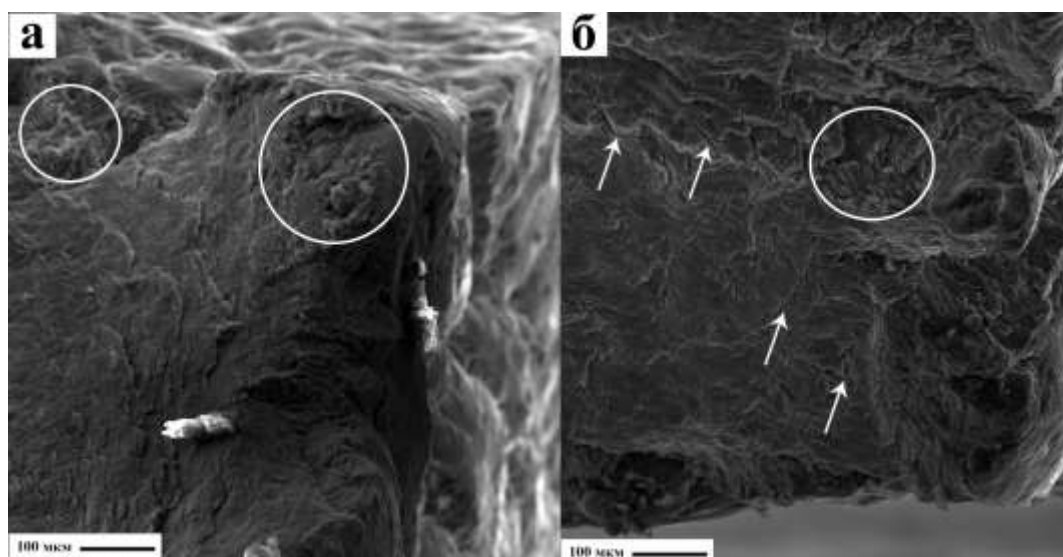


Рисунок 6 – СЭМ изображение структуры поверхности образца сплава А5М, разрушенного в условиях усталости в магнитном поле – «б» и без него – «а»

Figure 6 - SEM image of the surface structure of the A5M alloy sample, destroyed under fatigue conditions in a magnetic field - "b" and without it - "a"

Также стоит отметить, что в образцах, разрушенных при усталости в условиях постоянного действия магнитного поля 0,1 Тл, наблюдается большое количество трещин различного направления, что может говорить об отслоении материала по плоскостям (на рисунке 6 указаны стрелками).

В результате проведения фрактографического анализа не выявлено принципиальных различий морфологии поверхности разрушения в экспериментах с наложением магнитного поля и без него. Однако испытания сплава А5М при наложении магнитного поля приводит к некой пластификации материала, что выражается в увеличении количества циклов до разрушения. Также отмечаем, что формирование в волокнистой зоне ямок разрушения с элементами вытяжки наблюдается преимущественно в образцах, разрушенных в магнитном поле, причиной этого может служить отслоение материала по плоскости или вязкий скол.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сканирующая электронная микроскопия позволяет получать изображения поверхности исследуемого образца с высокой разрешающей способностью. Также позволяет получать трехмерные картинки, которые будут удобными в процессе изучения структуры различных материалов. В данной работе на примере некоторых сплавов (высокоэнтропийный сплав Al-Co-Cr-Fe-Ni, силумин системы Al-10 % Si, поверхность изло-

ма технически чистого алюминия) были получены изображения структуры методом сканирующей электронной микроскопии. Полученные изображения позволили увидеть структуру материалов, структуру, присутствующие фазы, включения вторых фаз, изломы поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldstein, J. Practical Scanning Electron Microscopy: Electron and Ion Microprobe Analysis. Springer Science & Business Media, 2012.
2. Reimer, L. Scanning electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis // Meas. Sci. Technol. – 2000. – V. 11(12). – P. 1826. – DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/703.
3. Clarke, A., Eberhardt, C., Eberhardt, C.N. Microscopy Techniques for Materials Science. – Woodhead Publishing, 2002.
4. Rickman, J.M., Lookman, T., Kalinin, S.V. Materials informatics: from the atomic-level to the continuum // Acta Mater. – 2019. – V. 168. – P. 473–510. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.051>.
5. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. Deep learning // Nature. – 2015. – V. 521. – P. 436–444. – <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
6. An active learning high-throughput microstructure calibration framework for solving inverse structure-process problems in materials informatics / A. Tran [et al.] // Acta Mater. – 2020. – V. 194. – P. 80–92. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.054>.
7. Image-driven discriminative and generative machine learning algorithms for establishing microstructure-processing relationships / W. Ma [et al.] // J. Appl. Phys. – 2020. – V. 128 (13). – P. 134901. – <https://doi.org/10.1063/5.0013720>.

8. Mining structure–property relationships in polymer nanocomposites using data driven finite element analysis and multi-task convolutional neural networks / Y. Wang [et al.] // *Mol. Syst. Des. Eng.* – 2020. – V. 5. – P. 962–975. – <https://doi.org/10.1039/D0ME00020E>.
9. Beniwal, A., Dadhich, R., Alankar, A. Deep learning based predictive modeling for structure-property linkages // *Materialia*. – 2019. – V. 8. – P. 100435. – DOI:10.1016/j.mtla.2019.100435.
10. Quantifying mechanical properties of automotive steels with deep learning based computer vision algorithms / E. Javaheri [et al.] // *Metals*. – 2020. – V. 10 (2). – P. 163. – <https://doi.org/10.3390/met10020163>.
11. Establishing structure-property localization linkages for elastic deformation of three-dimensional high contrast composites using deep learning approaches / Z. Yang [et al.] // *Acta Mater.* – 2019. – V. 166. – P. 335–345. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.045>.
12. George, E.P., Curtin, W.A., Tazan, C.C. Highentropyalloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. – 2020. – V. 188. – P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>.
13. Порачев, А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. – 2020. – Т. 121. – № 8. – P. 807–841. – DOI: 10.31857/S0015323020080094.
14. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes / J.W. Yeh [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2004. – V. 6. – № 5. – P. 299–303. – <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>.
15. Miracle, D.B., Senkov, O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Mater.* – 2017. – V. 122. – P. 448–511. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>.
16. Zhang, W., Liaw, P.K., Zhang, Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Sci China Mater.* – 2018. – V. 61. – № 1. – P. 2–22. – <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>.
17. Tsai, M.-H., Yeh, J.-W. High-Entropy Alloys: A Critical Review // *Mater. Res. Lett.* – 2014. – V. 2:3. – № 3. – P. 107–123. – <https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690>.
18. Alaneme, K.K., Bodunrin, M.O., Oke, S.R. Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review // *J. Mater. Res. Technol.* – 2016. – V. 5. – № 4. – P. 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004>.
19. Extremely high fatigue resistance in an ultrafine grained high entropy alloy / K. Liu [et al.] // *Appl. Mater. Today*. – 2019. – V. 15. – P. 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.04.001>.
20. Microstructure and mechanical properties of non-equiatom Co_{25.4}Cr₁₅Fe_{37.9}Mn_{3.5}Ni_{16.8}Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing / K.A. Osintsev [et al.] // *Materials Letters*. – 2022. – V. 312. – P. 131675. – <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131675>.
21. Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam / V.E. Gromov [et al.] // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – V. 19. – P. 4258–4269. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>.
22. Investigation of Co-Cr-Fe-Mn-Ni Non-Equiatom High-Entropy Alloy Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing / K. Osintsev [et al.] // *Metals*. 2022. – V. 12. – P. 197. – <https://doi.org/10.3390/met12020197>.
23. Microstructure and Phase Composition of the Cr-Mn-Fe-Co-Ni High-Entropy Alloy Obtained by Wire-Arc Additive Manufacturing / K. Osintsev [et al.] // *Key Engineering Materials*. – 2022. – V. 910. – P. 748–753. – <https://doi.org/10.4028/p-p2as1f>.
24. Zolotarevskiy, V.S., Belov, N.A., Glazoff, M.V. Casting aluminum alloys, first ed. Elsevier Science, 2007. – 544 p.
25. Поршневые силумины / Н.А. Белов [и др.]. – М.: Руда и металлы, 2011. – 246 с.
26. Лунев, Ф.А. Силумин. – М.: Ленинград ОНТИ, 1937. – 50 с.
27. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой: монография / В.Е. Громов [и др.]. – Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. – 285 с.
28. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al-11wt%Si alloy / D. Zaguliaev [et al.] // *Materials Research*. – 2020. – V. 23 (2). – P. e20200057. DOI:10.1590/1980-5373-mr-2020-0057.
29. Dispersion of al-si alloy structure by intensive pulsed electron beam / S. Konovalov [et al.] // *Archives of foundry engineering*. – 2019. – V. 19 (2). – P. 79–84.
30. Физические основы повышения усталостной долговечности нержавеющей сталей / Ю.Ф. Иванов [и др.]. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 302 с.
31. Hashemian, S., Keshtiban, P.M., Oskui, A.E. Fracture behavior of the forged aluminum 7075-T6 alloy under mixed-mode loading conditions // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 140. – P. 106610. – <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106610>.
32. Fracture dominant in friction stir spot welded joint between 6061 aluminum alloy and galvanized steel based on microscale tensile testing / T. Matsuda [et al.] // *Materials & Design*. – 2022. – V. 213. – P. 110344. – <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110344>.
33. Qin, D., Chen, C. Research on the mechanical property and failure mechanism of the dieless clinched joints of various aluminum alloys // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – V. 137. – P. 106384. – <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106384>.
34. Шестопалова, Л.П., Лихачева, Т.Е. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы: учеб. пособие. – Москва: МАДИ, 2017. – 180 с.

Информация об авторах

Ю. А. Шлярова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лабора-

тории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

В. В. Шляров – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений (ЭМОИ) Сибирского государственного индустриального университета.

И. А. Панченко – кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета.

С. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Сибирского государственного индустриального университета.

Р. А. Филиппев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры организации охраны и конвоирования в УИС Кузбасского института ФСИН России.

REFERENCES

1. Goldstein, J. (2012). Practical Scanning Electron Microscopy: Electron and Ion Microprobe Analysis. Springer Science & Business Media.
2. Reimer, L. (2020). Scanning electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis. Meas. Sci. Technol., (11-12) 1826. DOI:10.1088/0957-0233/11/12/703.
3. Clarke, A., Eberhardt, C. & Eberhardt, C.N. (2002). Microscopy Techniques for Materials Science. Woodhead Publishing.
4. Rickman, J.M., Lookman, T. & Kalinin, S.V. (2019). Materials informatics: from the atomic-level to the continuum. Acta Mater., (168) 473-510. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.051.
5. LeCun, Y., Bengio, Y. & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, (521) 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539.
6. Tran, A., Mitchell, J.A., Swiler, L.P. & Wildey, T. (2020). An active learning high-throughput microstructure calibration framework for solving inverse structure-process problems in materials informatics. Acta Mater., (194) 80-92. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.054.
7. Ma, W., Kautz, E.J., Baskaran, A., Chowdhury, A., Joshi, V., Yener, B. & Lewis, D.J. (2020). Image-driven discriminative and generative machine learning algorithms for establishing microstructure–processing relationships. J. Appl. Phys., (128-13) 134901. https://doi.org/10.1063/5.0013720.
8. Wang, Y., Zhang, M., Lin, A., Iyer, A., Prasad, A.S., Li, X., Zhang, Y., Schadler, L.S., Chen,

W. & Brinson, L.C. (2020). Mining structure-property relationships in polymer nanocomposites using data driven finite element analysis and multi-task convolutional neural networks. Mol. Syst. Des. Eng., (5) 962-975. https://doi.org/10.1039/D0ME00020E.

9. Beniwal, A., Dadhich, R., & Alankar, A. (2019). Deep learning based predictive modeling for structure-property linkages. Materialia, (8) 100435. DOI:10.1016/j.mtl.2019.100435.

10. Ehsan, J., Kumala, V., Javaheri, A., Rawassizadeh, R., Lubritz, J., Graf, B. & Rethmeier, M. (2020). Quantifying mechanical properties of automotive steels with deep learning based computer vision algorithms. Metals, (10-2) 163. https://doi.org/10.3390/met10020163.

11. Yang, Z., Yabansu, Y.C., Jha, D., Liao, W.-keng, Choudhary A.N., Kalidindi, S.R. & Agrawal, A. (2019). Establishing structure-property localization linkages for elastic deformation of three-dimensional high contrast composites using deep learning approaches. Acta Mater., (166) 335-345. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.045.

12. George, E.P., Curtin, W.A. & Tasan, C.C. (2020). High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. Acta Materialia, (188), 435-474. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015.

13. Rogachev, A.S. (2020). Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. The Physics of Metals and Metallography, (121-8) 733-764. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0015323020080094.

14. Yeh, J.W., Chen, S.-K., Lin, S.-J., Gan, J.-Y., Chin, T.-S., Shun, T.-T., Tsau, C.-H. & Chang, S.-Y. (2004). Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. Advanced Engineering Materials, (6-5) 299-303. https://doi.org/10.1002/adem.200300567.

15. Miracle, D.B. & Senkov, O.N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. Acta Mater., (122) 448-511. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081.

16. Zhang, W., Liaw, P.K. & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. Sci China Mater., (61-1) 2-22. https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8.

17. Tsai, M.-H. & Yeh, J.-W. (2014). High-Entropy Alloys: A Critical Review. Mater. Res. Lett., (2:3-3) 107-123. https://doi.org/10.1080/21663831.2014.912690.

18. Alaneme, K.K., Bodunrin, M.O. & Oke, S.R. (2016). Processing, alloy composition and phase transition effect on the mechanical and corrosion properties of high entropy alloys: a review. J. Mater. Res. Technol., (5-4) 384-393. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.004.

19. Liu, K., Nene, S.S., Frank, M., Sinha, S. & Mishra, R.S. (2019). Extremely high fatigue resistance in an ultrafine grained high entropy alloy. Appl. Mater. Today., (15) 525-530. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.04.001.

20. Osintsev, K.A., Kononov, S.V., Gromov, V.E., Ivanov, Yu.F., Panchenko, I.A. (2022). Microstructure and mechanical properties of non-equiatom

Co₂₅Cr₁₅Fe₃₇Mn₃Ni₁₆Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing. *Materials Letters*, (312) 131675. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131675>.

21. Gromov, V.E., Konovalov, S.V., Ivanov, Yu.F., Shliarova, Yu.A., Vorobyov, S.V., Semin, A.P. (2022). Structure and properties of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*, (19) 4258-4269, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>.

22. Osintsev, K., Konovalov, S., Zaguliaev, D., Ivanov, Y., Gromov, V., Panchenko, I. (2022). Investigation of Co-Cr-Fe-Mn-Ni Non-Equiatomic High-Entropy Alloy Fabricated by Wire Arc Additive Manufacturing. *Metals*, (12) 197. <https://doi.org/10.3390/met12020197>.

23. Osintsev, K., Konovalov, S., Gromov, V., Zaguliaev, D. (2022). Microstructure and Phase Composition of the Cr-Mn-Fe-Co-Ni High-Entropy Alloy Obtained by Wire-Arc Additive Manufacturing. *Key Engineering Materials*, (910) 748-753. <https://doi.org/10.4028/p-p2as1f>.

24. Zolotarevskiy, V.S., Belov, N.A. & Glazoff, M.V. (2007). *Casting aluminum alloys*, first ed. Elsevier Science.

25. Belov, N.A., Belov, V.D., Savchenko, S.V., Samoshina, M.E., Chernov, V.A. & Alabin, A.N. (2011). *Piston silumins. M.: Ore and metals*. (In Russ.).

26. Lunev, F.A. (1937). *Silumin. M.: Leningrad ONTI*. (In Russ.).

27. Gromov, V.E., Zagulyaev, D.V., Ivanov, Yu.F., Konovalov, S.V., Nevsky, S.A., Sarychev, V.D., Budovskikh, E.A. & Rubannikov, Yu.A. (2020). Structure and hardening of silumin modified by electron-ion plasma: monograph. Novokuznetsk: Publishing Center SibGIU. (In Russ.).

28. Zaguliaev, D., Ivanov, Yu., Konovalov, S., Abaturova, A., Gromov, V., Rubannikova, Yu., & Semin, A. (2020). Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al-11wt%Si alloy. *Materials Research*. (23-2) e20200057. DOI:10.1590/1980-5373-mr-2020-0057.

29. Konovalov, S., Gromov, V., Zagulyaev, D., Ivanov, Yu., Semin, A. & Rubannikova, J. (2019). Dispersion of al-si alloy structure by intensive pulsed electron beam. *Archives of foundry engineering*, (19-2) 79-84.

30. Ivanov, Yu.F., Vorobyov, S.V., Konovalov, S.V., Gromov, V.E. & Koval, N.N. (2011). *Physical foundations for increasing the fatigue life of stainless steels*. Novokuznetsk: Publishing House «Inter-Kuzbass». (In Russ.).

31. Hashemian, S., Keshtiban, P.M. & Oskui, A.E. (2022). Fracture behavior of the forged aluminum 7075-T6 alloy under mixed-mode loading conditions. *Engineering Failure Analysis*, (140) 106610. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106610>.

32. Matsuda, T., Ogaki, T., Hayashi, K., Iwamoto, C., Nozawa, T., Ohata, M. & Hirose, A. (2022). Fracture dominant in friction stir spot welded joint between 6061 aluminum alloy and galvanized steel based on microscale tensile testing. *Materials & Design*, (213) 110344. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110344>.

33. Qin, D. & Chen, C. (2022). Research on the mechanical property and failure mechanism of the dieless clinched joints of various aluminum alloys. *Engineering Failure Analysis*, (137) 106384. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106384>.

34. Shestopalova, L.P. & Likhacheva, T.E. (2017). *Methods for the study of materials and machine parts during autotechnical expertise: textbook*. allowance. Moscow: MADI.

Information about the authors

Yu. A. Shliarova - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

V. V. Shlyarov - post-graduate student of the Department of Natural Sciences named prof. V.M. Finkelya, Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

I. A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing of the Siberian State Industrial University.

S. V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of the Siberian State Industrial University.

R. A. Filipiev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Organization of Security and Convoy at the Penitentiary Service of the Kuzbass Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 30.11.2022; принята к публикации 15.12.2022.

The article was received by the editorial board on 10 Oct 2022; approved after editing on 30 Nov 2022; accepted for publication on 15 Dec 2022.