

Научная статья

УДК 669.14+669.15-194.55

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ СТРУКТУРЫ МАРТЕНСИТА И РАЗМЕРА КАРБИДНОЙ ФАЗЫ НА ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Г.С. Севальнев¹, Е.Н. Коробова¹, Р.М. Дворецков¹, А.В. Дорошенко¹,
С.-В. Р. Музафарова², И.И. Самойлова³

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

²Акционерное общество «ОДК-Климов», Москва, Россия; klimov@klimov.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

***Аннотация.** Рассмотрено влияние степени дисперсности мартенситной структуры на триботехнические характеристики высокоуглеродистой комплексно-легированной стали. После упрочняющей термической обработки образцов с различными степенями деформации получены образцы со структурой от мелко- до крупноигольчатого мартенсита. По результатам испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения установлено, что скорость изнашивания образцов с мелкоигольчатой мартенситной структурой по сравнению со скоростью образцов со средне- и крупноигольчатой мартенситной структурой меньше на 50 и 70 % соответственно.*

***Ключевые слова:** подшипник, износостойкость, трение, дисперсность мартенсита, микроструктура, твердость*

***Для цитирования:** Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М., Дорошенко А.В., Музафарова С.-В.Р., Самойлова И.И. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.*

Scientific article

INFLUENCE OF THE DEGREE OF MARTENSITIC STRUCTURE DISPERSION AND SIZE OF CARBIDE PHASE ON THE FRICTIONAL INTERACTION UNDER CONDITIONS OF DRY SLIDING FRICTION OF HIGH-CARBON COMPLEX ALLOY STEEL

G.S. Sevalnev¹, E.N. Korobova¹, R.M. Dvoreckov¹, A.V. Doroshenko¹,
S.-V.R. Muzafarova², I.I. Samoilova³

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

²Joint Stock Company «UEC-Klimov», Moscow, Russia; klimov@klimov.ru

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. *The article considers the effect of the martensitic structure dispersion degree on the tribotechnical characteristic of high carbon complex-alloyed steel. After hardening heat treatment of samples with a various degree of deformation there have been obtained samples with a structure from fine- to large-needle martensite. According to the results of the wear test under conditions of dry sliding friction it has been found that samples with a structure of fine-needle martensite have a wear rate lower by 50 and 70 % compared to medium- and large-needle martensitic structures.*

Keywords: *bearing, wear resistance, friction, dispersion of martensite, microstructure, hardness*

For citation: Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-06-15-26.

Введение

Подшипники качения являются одним из наиболее ответственных элементов большинства машин и механизмов в машиностроительной отрасли. Требования, предъявляемые к качеству подшипников в авиационной промышленности, намного превосходят требования к подшипникам в других областях машиностроения. Совершенствование авиационной техники требует постоянного улучшения конструкций подшипников, повышения их грузоподъемности, точности и скорости вращения, долговечности и надежности в условиях сложного напряженного состояния при циклических нагрузках. В связи с этим материалы, из которых изготавливают тела качения и кольца, должны обладать достаточными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими высокую работоспособность изделий [1–4].

Основной характеристикой, определяющей долговечность работы подшипников качения, является контактная выносливость материала. Известно, что при качественном монтаже и оптимальных условиях работы подшипников качения их повреждаемость и выход из строя происходят в результате разрушений усталостного характера [5–8]. Однако существует ряд факторов, значительно влияющих на их работоспособность. Одним из таких факторов является износ поверхностей качения, который может возникать по следующим причинам: значительное проскальзывание тела относительно опоры качения, попадание в зону трибоконтакта абразивных частиц, работа в условиях «смазочного голодания», возникновение и повышение уровня вибраций [5]. Относительное проскальзывание поверхностей качения чаще всего свойственно подшипникам с увеличенным радиальным зазором при действии легких нагрузок и вращении с повышенной частотой. Изнашивание подвижных опор машин вызывает потерю точности взаимного расположения деталей и перемещений, что приводит к возникновению чрезмерных вибраций и разрушению [9].

Помимо этого, большое влияние на трибосопряжение деталей подшипников оказывает смазка трущихся поверхностей. В том случае, если при работе в высокоскоростной тяжело нагруженный подшипник подается смазочный материал в недостаточном количестве, наступает режим «смазочного голодания». Снижение количества смазочного материала в зоне контакта вызывает увеличение коэффициента трения, значительно повышающего температуру подшипников, и движение качения переходит в скольжение, сопровождаемое значительным изнашиванием поверхностей качения [9, 10].

Величина износа деталей подшипников, помимо конструктивных особенностей, точности изготовления, монтажа и режимов работы подшипниковых узлов, зависит от химического состава используемого материала. Для обеспечения требуемой работоспособности

и надежности этих изделий применяют высокоуглеродистые комплексно-легированные стали мартенситного класса, способные работать в условиях интенсивного изнашивания, экстремальных температур (в диапазоне 350–500 °С) без значительного разупрочнения и выдерживать высокие циклические нагрузки различного характера [11–16]. Формирование высокоуглеродистого мартенсита в совокупности с твердыми избыточными фазами после упрочняющей термической обработки позволяет таким сталям работать в условиях интенсивного изнашивания и контактной усталости.

Износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой, и формирование высокой твердости не всегда приводит к получению максимальной износостойкости. Параметры структурных составляющих (дисперсность мартенсита, количество и морфология карбидов) и их распределение по объему детали также имеют большое значение при формировании триботехнических характеристик [17].

Цель данной работы – исследование структуры и оценка влияния степени дисперсности мартенсита на триботехнические характеристики высокоуглеродистой комплексно-легированной стали для авиационных подшипников.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из высокоуглеродистой комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали системы легирования С–Cr–Mo–V, содержащей в химическом составе тугоплавкие карбидообразующие элементы W и Ta.

Металлографические исследования структуры проводили, в соответствии с ГОСТ 8233–56 и ГОСТ 5639–82, на оптическом микроскопе Olympus GX-51, оснащенном фотокамерой и программой анализа изображений Analysis, на металлографических шлифах, вырезанных в поперечном направлении после травления в 4 %-ном спиртовом растворе HNO₃.

Исследование структурных составляющих и расчет стехиометрии избыточных фаз после термической обработки осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU8010 в режиме вторичных и обратноотраженных электронов при рабочих увеличениях ×2500 и ускоряющем напряжении 15 кВ с приставкой для проведения микрорентгеноспектрального анализа с применением программного обеспечения Aztec. Для анализа распределения легирующих элементов в структуре матрицы выполняли поэлементное картирование с помощью энергодисперсионных спектров.

ДюрOMETрические исследования проводили по методу Виккерса на твердомере Durascan 20 по ГОСТ 2999–75.

Измерение твердости осуществляли по методу Роквелла на твердомере DuraVision 300 по ГОСТ 9013–59.

Исследование триботехнических характеристик образцов из теплостойкой подшипниковой стали проводили путем испытания образцов на изнашивание в условиях сухого трения скольжения с использованием трибометра Nanovea T-50. Испытания осуществляли по схеме «стержень–диск» (pin-on-disk) при линейной скорости скольжения образца относительно контртела ~0,1 м/с и с нагрузкой на стержень 10 Н (1 кг). Контртелом при испытаниях являлся шарик диаметром 6 мм из хромистой стали мартенситного класса ШХ15-ШД (зарубежный аналог – сталь AISI 52100) с твердостью 64 HRC (940 HV). Во время испытаний с помощью датчика сопротивления измеряли коэффициент трения, а с помощью датчика линейного перемещения LVDT при взаимном износе образца и контртела – характер фрикционного взаимодействия. По результатам испытаний определяли скорость изнашивания образцов по формуле, представленной в работе [18].

Результаты и обсуждение

Образцы из высокоуглеродистой комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали подвергали упрочняющей термической обработке по следующей схеме: закалка при температуре, обеспечивающей практически полное растворение избыточных фаз, и последующий многократный отпуск для снижения доли остаточного аустенита в структуре стали. Для оценки влияния структурных составляющих на триботехнические характеристики исследовали образцы с разной степенью пластической деформации (30, 45 и 80 %) при горячей обработке давлением с целью получения разной степени дисперсности мартенситной структуры при термической обработке. Степень дисперсности мартенсита напрямую зависит от величины аустенитного зерна. Для получения высокого уровня механических характеристик, в особенности контактной выносливости и износостойкости, после закалки необходимо получить структуру со степенью дисперсности от скрыто- до среднеигольчатого мартенсита [19]. Наличие крупноигольчатого мартенсита в микроструктуре детали может способствовать снижению уровня эксплуатационных характеристик изделия из-за его высокой хрупкости [20].



Рис. 1. Микроструктура образцов из теплостойкой подшипниковой стали с мелко- (а), средне- (б) и крупноигольчатым мартенситом (в) после упрочняющей термической обработки

ДюрOMETрические исследования показали, что мартенситная матрица с разной степенью дисперсности обладает идентичными средними значениями твердости (рис. 2).

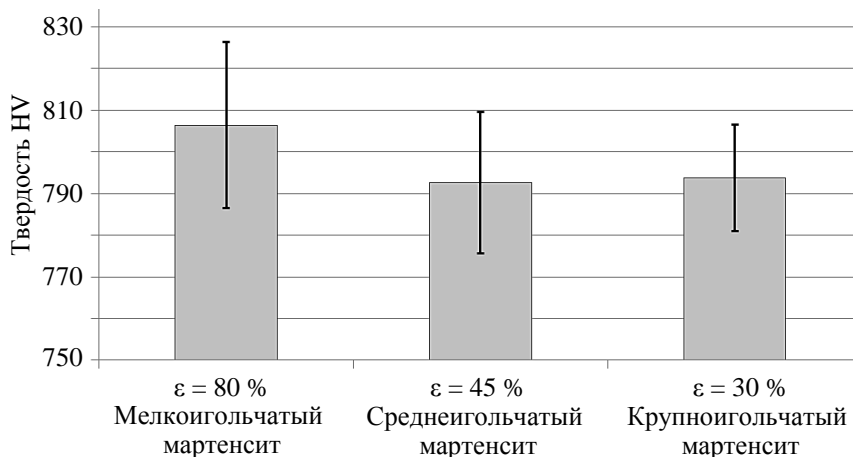


Рис. 2. Твердость образцов из теплостойкой подшипниковой стали с разной степенью пластической деформации ϵ после упрочняющей термической обработки

Исследование структуры методом электронной микроскопии позволило выявить в структуре всех образцов, наряду с мелкодисперсными сферическими карбидами,

крупные избыточные фазы. По результатам рентгеноспектрального микроанализа установлено, что мелкодисперсными сферическими и крупными избыточными фазами являются карбиды специального типа, содержащие молибден, тантал, вольфрам, ниобий и ванадий. Ввиду сложности химического состава исследуемых карбидов для оценки стехиометрического состава использована открытая база данных по существованию химических соединений при нормальных условиях [21].

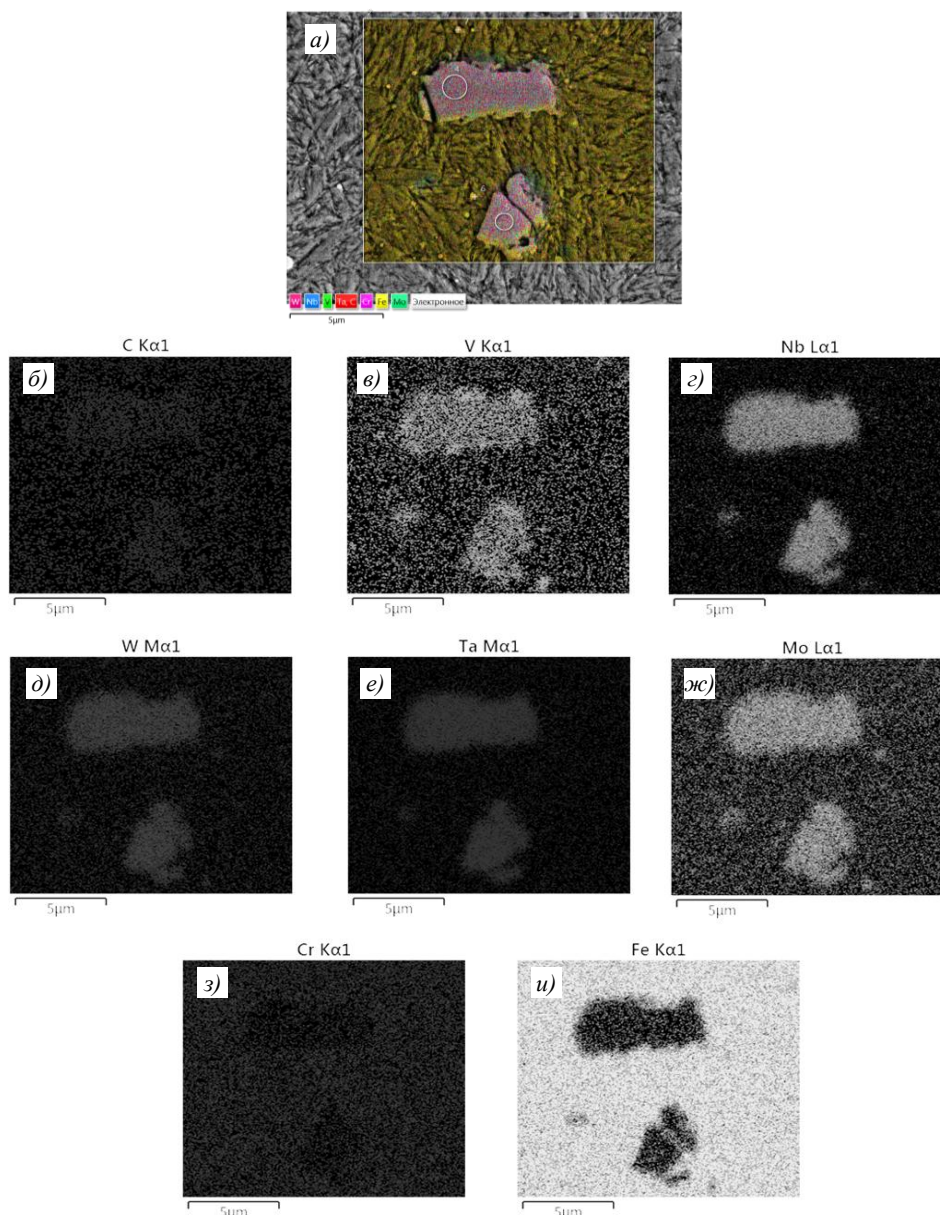


Рис. 3. Электронное изображение структуры (*a*, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 80 % и карты энергодисперсионных спектров по химическим элементам: C (*б*), V (*в*), Nb (*з*), W (*д*), Ta (*е*), Mo (*ж*), Cr (*з*) и Fe (*и*)

Металлографическое исследование образца со степенью деформации 80 % и с мелкоигольчатой мартенситной структурой с помощью картирования энергодисперсионных спектров элементов показало, что карбиды легированы практически всеми элементами, кроме хрома и железа (рис. 3). При использовании данных локального химического анализа по соотношению элементов (рис. 4), а также информации с полученного

изображения о детальном строении карбида можно предположить, что при такой системе легирования сформирован комплексный карбид с преобладающей основой $(Ta, Nb)C_2$ с тригональной кристаллической решеткой, на поверхности которого и рядом с ним формируются мелкодисперсные карбиды размером <2 мкм следующего стехиометрического состава: $(Mo, W)C_2$ – с орторомбической кристаллической решеткой и VC – с кубической кристаллической решеткой. Такое комплексное формирование карбида и его насыщенность легирующими элементами, по-видимому, является причиной того, что базовый карбид имеет размер $\sim(10-12)$ мкм и остроугольную морфологию. Мелкодисперсные сферические карбиды в мартенситной матрице могут обладать стехиометрическим составом $(Ta, V)C_2$ и тригональной кристаллической решеткой, но по основным легирующим элементам доминируют карбиды со стехиометрическим составом $(Mo, W)C_2$ с орторомбической кристаллической решеткой, а также с составами VC и $Cr_{23}C_6$ с кубическими кристаллическими решетками.

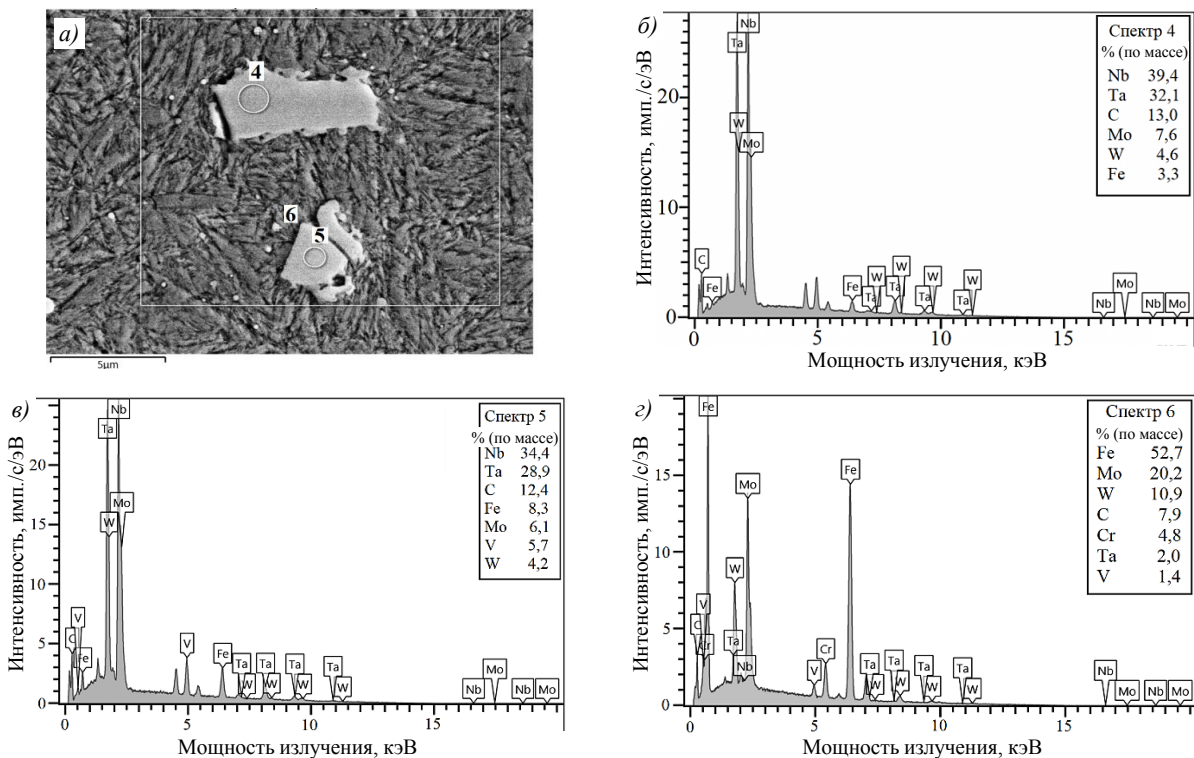


Рис. 4. Электронное изображение структуры (а, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 80 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: б – $(Nb, Ta)C_2$ и $(Mo, W)C_2$; в – $(Nb, Ta)C_2$, $(Mo, W)C_2$ и VC; г – $(Ta, V)C_2$ и $(Mo, W)C_2$

В образце со степенью деформации 45 % и со среднеигольчатой мартенситной структурой присутствуют локальные зоны с угловатыми и протяженными карбидами размером от 10 до 25 мкм, которые могут являться концентраторами напряжений, а также выкрашиваться, попадая в зону трибоконтакта и выступая в качестве абразивного материала [19]. Аналогичный результат анализа энергодисперсионных спектров (рис. 5) получен на образце со степенью деформации 80 % с некоторыми дополнениями в стехиометрическом составе карбидных фаз. Помимо наличия в структуре карбидов $(Nb, Ta)C_2$ и $(Mo, W)C_2$ также присутствуют и такие карбиды, как $(V, Ti)C_2$ и $(V, Cr)C_2$ с тригональными кубическими решетками.

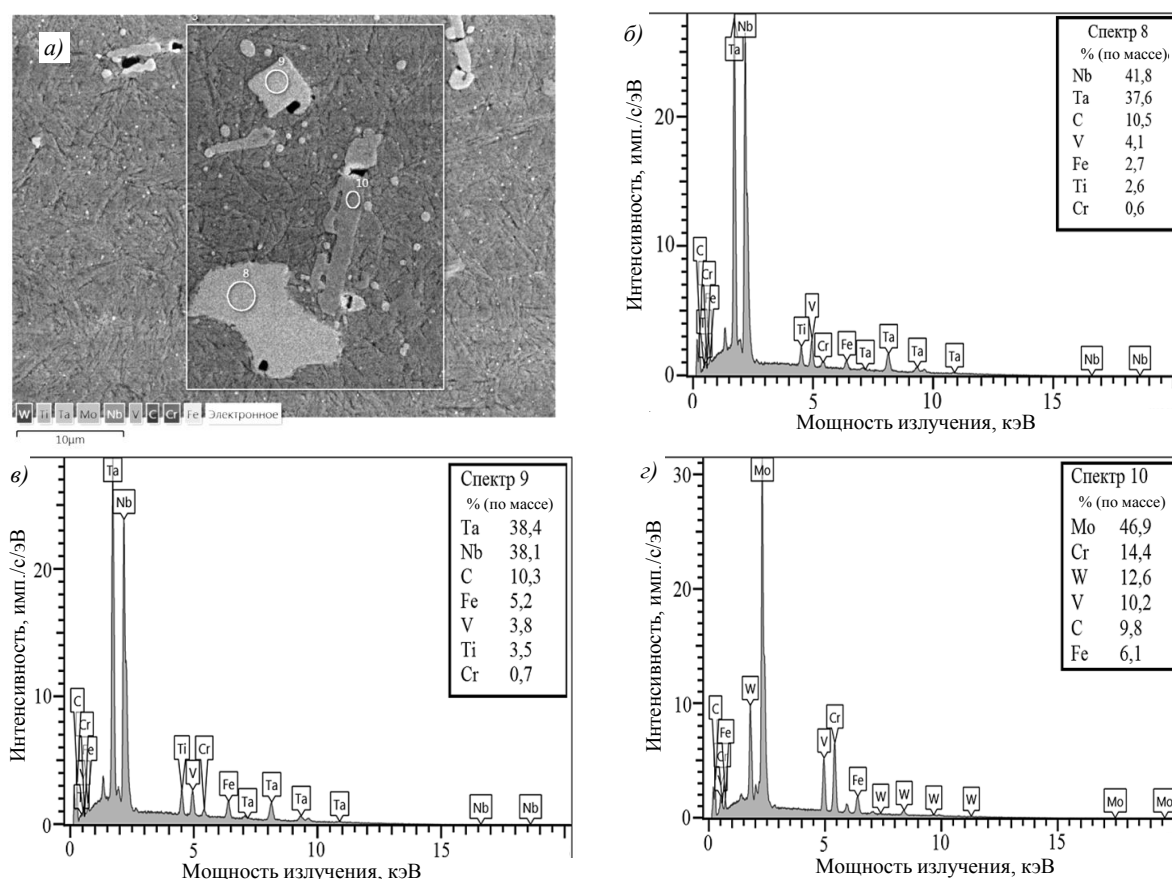


Рис. 5. Электронное изображение структуры (а, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 45 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: б – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; в – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; з – $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ и $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$

Аналогичный результат также получен на образце со степенью деформации 30 % и с крупноигльчатой матрицей. В структуре присутствуют локальные скопления протяженных карбидов угловатой формы размером >10 мкм. При данной степени деформации в структуре наблюдаются все указанные ранее карбиды: $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ (рис. 6). Возможность существования такого скопления карбидов, а также их стехиометрический состав требуют детального изучения, однако по соотношению химических элементов вероятность таких сегрегаций мелкодисперсных карбидов относительно крупной избыточной фазы вполне возможна.

Для исследования износостойкости образцов из комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали проводили испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения в течение 1 ч. По результатам испытаний установлено, что структура мелкоигльчатого мартенсита обладает более стабильным коэффициентом трения, чем структура средне- и крупноигльчатого мартенсита (рис. 7). Время до выхода на стационарный режим трения для образца с мелкоигльчатым мартенситом составило 8 мин, со среднеигльчатым – около 6 мин, с крупноигльчатым – 2 мин. Увеличение амплитуды колебаний при выходе на стационарный режим свидетельствует о более высокой хрупкости структуры образца, в которой в процессе испытания могут формироваться микросколы и повышаться шероховатость. Такой характер фрикционного взаимодействия наблюдается на образцах со средне- и крупноигльчатым мартенситом. Значительной амплитуды колебаний по коэффициенту трения, связанных с попаданием в зону трибоконтакта абразива в виде выкрошенных карбидов, в процессе испытания не наблюдалось.

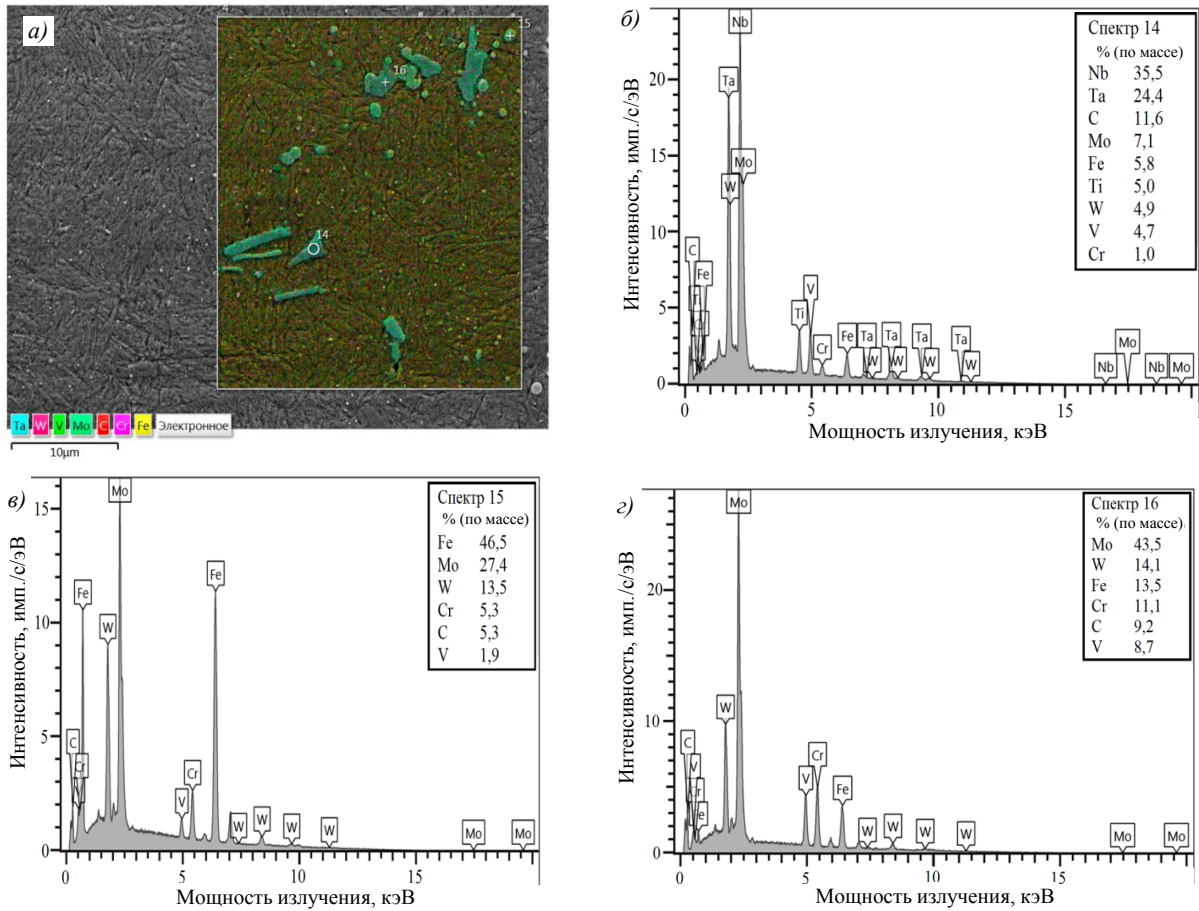


Рис. 6. Электронное изображение структуры (а, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 30 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: б – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; в, г – $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$

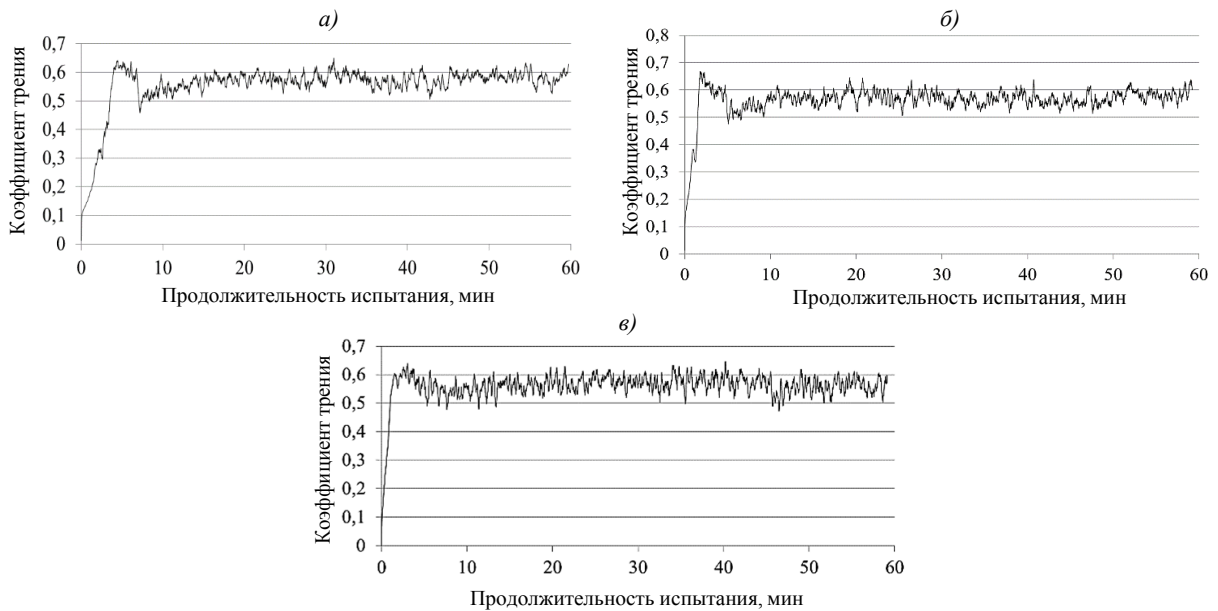


Рис. 7. Изменение коэффициента трения в процессе испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения образцов из теплостойкой подшипниковой стали с мелко- (а), средне- (б) и крупноигольчатым (в) мартенситом

Результаты измерения скорости изнашивания (рис. 8) также подтвердили, что формирование в структуре мелкоигольчатого мартенсита с избыточными фазами <10 мкм позволяет снизить данный показатель на 50 % по сравнению со среднеигольчатым мартенситом и на 70 % по сравнению с крупноигольчатым.

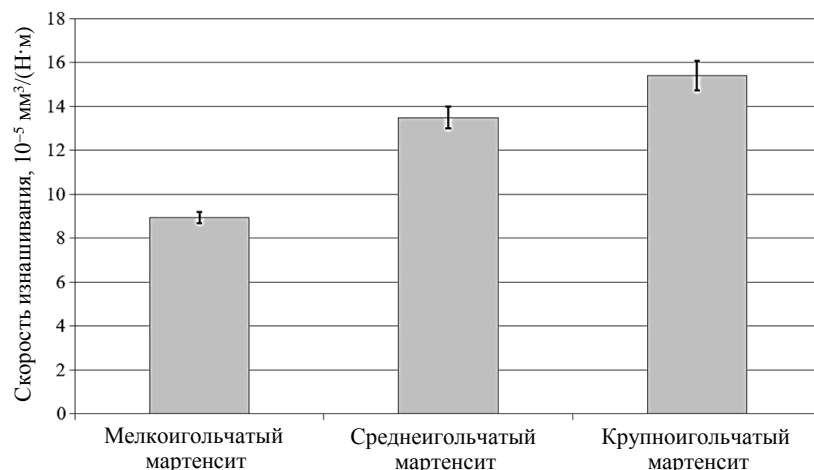


Рис. 8. Скорость изнашивания образцов из теплостойкой подшипниковой стали с различной степенью дисперсности мартенситной структуры

Заключения

Подшипники качения являются ответственными изделиями высоконагруженных узлов машин и механизмов, которые могут работать в условиях циклических нагрузок и интенсивного изнашивания, а также при экстремальных температурах (в диапазоне 350–500 °С). Формирование структуры мартенсита требуемой дисперсности без крупных избыточных фаз в подшипниковых сталях позволяет повысить уровень механических характеристик для обеспечения несущей способности в условиях эксплуатации.

По результатам металлографических исследований микроструктуры высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали установлено, что помимо дисперсности мартенситной структуры степень деформации при горячей обработке давлением влияет на размер и скопление карбидных фаз, но практически не оказывает влияния на среднее значение твердости после упрочняющей термической обработки. После горячей обработки давлением образца со степенью деформации 80 % размер карбидов не превышает 10 мкм; при степени деформации 30 и 45 % размер карбидов находится в диапазоне 10–25 мкм. Ввиду развитой системы легирования в микроструктуре высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали образуются комплексные карбиды, имеющие следующий состав: $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ и VC. Стехиометрический состав и механизм образования комплексных карбидов в высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали требуют дальнейшего изучения.

Испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения по схеме «стержень–диск» позволили установить, что формирование структуры мелкоигольчатого мартенсита и карбидов размером <10 мкм способствует снижению скорости изнашивания на 50 % по сравнению со среднеигольчатым мартенситом и на 70 % по сравнению с крупноигольчатым.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлург*. 2013. № 12. С. 4–8.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
5. Пинегин С.В. Опоры качения в машинах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 150 с.
6. Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Наприенко С.А. Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа // *Труды ВИАМ*. 2016. № 1 (37). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
7. Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Севальнев Г.С. Влияние технологических факторов на эксплуатационную стойкость подшипников из стали ЭИ347-Ш // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 12. С. 43–47.
8. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
9. Спришевский А.И. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 632 с.
10. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
11. Контер Л.Я. Стали для теплостойких подшипников (обзор). М.: НИИНАвтопром, 1978. 78 с.
12. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тоньшева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Коробова Е.Н., Севальнев Г.С., Громов В.И., Леонов А.В. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
14. Корнеев А.А. Расчет времени нагрева кольца подшипника // *Сборник научных трудов 4-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современные инновации в науке и технике»*. Курск, 2014. С. 265–267.
15. Корнеев А.А. Выбор температуры закалки стали ЭИ347-Ш // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективное развитие науки, техники и технологий»*. Курск, 2013. С. 157–158.
16. Морозова Л.В. Повреждаемость подшипников качения в процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей // *Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года*. М.: ВИАМ, 2019. С. 175–189.
17. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Metallurgia, 1983. 525 с.
18. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // *Труды ВИАМ*. 2021. № 10 (104). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
19. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Metallurgia, 1980. 264 с.

20. Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали (для подшипников и инструментов). М.: Машгиз, 1963. 384 с.
21. The Materials Project. URL: <http://materialsproject.org> (дата обращения: 10.02.2022).

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Without new materials – there is no future. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
3. Kablov E.N. What to make the future from? The materials of the new generation, the technology of their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Kablov E.N. The materials of the new generation are the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Pinegin S.V. *Rolling supports in cars*. Moscow: Publishing House of the AS USSR, 1961. 150 p.
6. Orlov M.R., Grigorenko V.B., Morozova L.V., Naprienko S.A. Research of operational damages of bearings by methods of optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 9. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
7. Kotov S.A., Muzafarova S.-V.R., Sevalnev G.S. The influence of technological factors on the operational resistance of bearings from steel EI347-Sh. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2020, no. 12, pp. 43–47.
8. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
9. Porishevsky A.I. *Rolling bearings*. Moscow: Mechanical Engineering, 1968, 632 p.
10. Zaitsev A.M., Korostashevsky R.V. *Operation of aviation rolling bearings*. Moscow: Transport, 1968, 224 p.
11. Conter L.Ya. *Steel for heat-resistant bearings (review)*. Moscow: NIIavtoprom, 1978, 78 p.
12. Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Pokrovskaya N.G., Tonyshcheva O.A. High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Korobova E.N., Sevalnev G.S., Gromov V.I., Leonov A.V. Steels for the manufacture of roller bearings for special purposes (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
14. Korneev A.A. Calculation of the heating time of the bearing. *Modern innovations in science and technology: Proceedings of 4th Int. Scientific and Practical Conf. Kursk: Universitetskaya kniga*, 2014, pp. 265–267.
15. Korneev A.A. The choice of hardening temperature became EI347-Sh. *Prospective development of science, technology and technology: Materials of 3rd Int. Scientific and Practical Conf. Kursk: Universitetskaya kniga*, 2013, pp. 157–158.
16. Morozova L.V. The damage to rolling bearings during the operation of aviation gas turbine engines. *The role of fundamental research in the implementation of strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030*. Moscow: VIAM, 2019, pp. 175–189.
17. Geller Yu.A. *Instrumental steel*. Moscow: Metallurgy, 1983, 525 p.
18. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

19. Spector A.G., Zelbet B.M., Kiseleva S.A. *The structure and properties of bearing steels*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p.
20. Rausin Ya.R. *Thermal processing of chromium steel (for bearings and tools)*. Moscow: Mashgiz, 1963, 384 p.
21. *The Materials Project*. Available at: <https://materialsproject.org> (accessed: February 10, 2022).

Информация об авторах

Севальнёв Герман Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коробова Елена Николаевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дворецков Роман Михайлович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дорошенко Антон Валерьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Музафарова Светлана-Виктория Рустамовна, инженер-технолог, АО «ОДК-Климов», klimov@klimov.ru

Самойлова Ирина Игоревна, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauvan@bmstu.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena N. Korobova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman M. Dvoreckov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton V. Doroshenko, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana-Victoria R. Muzafarova, Engineer-technologist, JSC «UEC-Klimov», klimov@klimov.ru

Irina I. Samoilova, Student, Bauman Moscow State Technical University, bauvan@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.03.2022.

The article was submitted 15.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 23.03.2022.