

УДК 669.055

Д.П. Фарафонов<sup>1</sup>, О.А. Базылева<sup>1</sup>, А.М. Роголев<sup>1</sup>**СПЛАВЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК РАБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-7-7

*Представлены результаты сравнительных исследований свойств разработанных во ФГУП «ВИАМ» материалов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбины ГТД и свойства зарубежных материалов, применяемых для упрочнения деталей трения, работающих в экстремальных условиях, в том числе для повышения износостойкости бандажных полок лопаток.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, истираемые уплотнительные материалы» и 10.3. «Технологии атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных порошков сплавов на различной основе для аддитивных технологий и порошков припоев для пайки» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** бандажные полки рабочих лопаток, износостойкость, стеллит, наплавка.

*The results of properties comparative research of materials developed by FSUE «VIAM» for hardening the bandage shelves of gas turbine engines rotor blades and properties of foreign materials used for hardening of the friction components operating in extreme conditions particularly for improving wear resistance of the blades bandage shelves are presented. This work is carried out in the frames of integrated scientific directions: 9.7. «High-temperature deformable alloys and the composite materials strengthened by high-melting metal fibers and particles, abraded sealing materials» and 10.3. «Technologies of atomization for production of fine-dispersed high-quality powders of different metal alloys for the additive technologies» («The strategic directions of materials and technologies of their processing development for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** rotor blade shroud, wear resistance, stellite, deposit welding.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

В конструкциях турбин современных ГТД широко применяются лопатки с бандажными полками, имеющими на боковых торцах контактные площадки для обеспечения жесткости связи всех лопаток после их сборки в колеса. Такое соединение лопаток способствует повышению их вибрационной прочности. Вместе с тем повреждение бандажных полок является одним из главных факторов, ограничивающих ресурс лопаток и двигателя в целом. В условиях высоких температур и в результате динамического контактного нагружения бандажные полки турбинных лопаток наиболее интенсивно изнашиваются. Кроме того, в диапазоне температур 700–1100°С при виброконтakтном динамическом нагружении имеет место процесс высокотемпературной фреттинг-коррозии, который приводит к износу и повреждаемости контактных площадок. Эффективным способом

увеличения долговечности лопаток является упрочнение бандажных полок путем нанесения на контактные поверхности покрытий или напайки пластин из износостойких сплавов. Многолетний опыт эксплуатации рабочих лопаток турбин с упрочненными бандажными полками износостойким сплавом на никелевой основе (ВЖЛ2) и сплавами на кобальтовой основе (ВЗК и ХТН-61) полностью подтвердил надежность данного технологического решения [2–4].

Широкое применение для деталей узлов трения, длительно работающих при высоких температурах (до 800°C), в том числе для упрочнения бандажных полок лопаток, получил разработанный во ФГУП «ВИАМ» сплав ВЖЛ2. Для упрочнения лопаток при более высоких температурах ИМФ НАН Украины совместно с ГП ЗМКБ «Прогресс» им. академика А.Г. Ивченко был разработан сплав на основе кобальта (ХТН-61), который получил серийное применение на двигателях производства ГП ЗМКБ «Прогресс» и ОАО «Мотор-Сич». Применение износостойких сплавов для упрочнения лопаток позволило продлить межремонтный ресурс ГТД в несколько раз [5].

В настоящее время, в связи с ростом рабочих температур, нагрузок, требований к ресурсу и экономичности современных и перспективных ГТД, применяемые износостойкие сплавы не всегда устраивают конструкторов и производителей ГТД, и вопрос создания новой, эффективной защиты контактирующих поверхностей рабочих лопаток турбины становится все более актуальной задачей авиастроения [1, 6].

Последними разработанными во ФГУП «ВИАМ» (более 25 лет назад) износостойкими сплавами, предназначенными для применения в качестве упрочняющих покрытий деталей трения, работающих в экстремальных условиях в широком диапазоне температур, в том числе для повышения износостойкости и ремонта бандажных полок рабочих лопаток, являются сплавы В4К и Х25Н10В8, представляющие собой стеллит системы Co–Cr–W–C, легированный элементами IV–V групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева, а также интерметаллидный сплав ВКНА-2М на основе соединения Ni<sub>3</sub>Al [7]. Максимальные температуры эксплуатации этих сплавов 1000–1100°C, но широкого серийного применения они не получили, что связано с разработкой и внедрением более дешевого износостойкого сплава ВЖЛ2, который на тот момент устраивал конструкторов по всем своим характеристикам, в том числе максимальной рабочей температуре – до 900°C. Вместе с тем по ряду показателей разработанные во ФГУП «ВИАМ» сплавы В4К, Х25Н10В8 и ВКНА-2М не уступают современным зарубежным аналогам и могут быть использованы для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток современных ГТД после проведения работ по технологическому опробованию, корректировки составов (при необходимости) и адаптации для применения современных технологий нанесения упрочняющих покрытий. Одним из перспективных методов упрочнения и ремонта бандажных полок лопаток может быть применение технологии лазерной напайки порошковых композиций на основе разработанных износостойких сплавов [8–12].

В данной статье представлены результаты сравнительных исследований свойств разработанных во ФГУП «ВИАМ» материалов для упрочнения бандажных полок лопаток и свойства зарубежных материалов, применяемых для упрочнения деталей трения, работающих в экстремальных условиях, в том числе для повышения износостойкости рабочих лопаток турбины ГТД, – сплавы на основе кобальта марок ХТН-61, СМ 64 и Т-800. Все исследованные износостойкие сплавы представляют собой твердые растворы с мягкой матрицей, упрочненной различными фазовыми составляющими (фазами Лавеса, карбидами и боридами разных составов и др.), отличающимися высокой твердостью и обеспечивающими износостойкость сплава.

### Материалы и методы

Для проведения исследований основных свойств износостойких материалов – упрочнителей бандажных полок лопаток, в соответствии с разработанными производственными инструкциями выплавлены шихтовые заготовки сплавов ВЖЛ2, Х25Н10В8, В4К и ВКНА-2М. Исследованы механические свойства и структура каждой композиции. Кратковременную прочность и пластичность определяли по ГОСТ 1497–84, твердость – по ГОСТ 8.064–94.

Износостойкость сплавов в условиях динамического виброконтрастного нагружения исследовали по специальной методике, разработанной для определения триботехнических характеристик жаропрочных материалов при температурах до 1100°C, обеспечивающей измерение параметров износостойкости с достаточной достоверностью при статической и динамической составляющих нормальной нагрузки на испытываемые образцы. Методика включает определение линейного износа образцов с помощью профилографирования, что достаточно точно отражает не только абсолютную величину износа образца, но и характер изменения рельефа поверхности. Одними из параметров, определяемых при испытаниях по данной методике, являются:  $H_h$  – средний линейный износ, характеризующий изменение рельефа дорожки трения относительно базовой поверхности;  $H_{\max}$  – максимальное локальное повреждение рабочей поверхности (в пределах дорожки трения).

Средний линейный износ  $H_h$  вычисляли по формуле:

$$H_h = \frac{\sum_{i=1}^n H_{h_i}}{n},$$

где  $H_{h_i}$  – средний линейный износ по одной профилограмме, рассчитанный при количестве точек рельефа не менее 30 на дорожке трения;  $n$  – количество профилограмм, снятых на одном образце (не менее трех при каждом фиксированном уровне нагрузок и температур).

Испытания проводили при следующих параметрах трибосопряжения:

- амплитуда взаимного перемещения образца относительно контробразца –  $A=200\pm 10$  мкм;
- статическая нагрузка при контакте –  $P_{\text{ст}}=180$  Н;
- максимальное значение динамической нагрузки при контакте –  $P_{\text{дин}}=250$  Н;
- площадь контакта –  $S=10$  мм<sup>2</sup>;
- температура испытаний 20, 700, 800, 900, 1000 и 1100°C.

Для оценки уровня свойств износостойких сплавов, разработанных во ФГУП «ВИАМ», и сравнения с аналогами выбраны современные зарубежные сплавы, применяемые для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД, свойства которых представлены в литературных источниках [13–16]:

– Coast Metal 64 (СМ-64) – стеллит на основе системы Co–Cr–W–C, применяемый для наплавки на контактные площадки бандажных полок лопаток турбины; сплав сохраняет высокую прочность при температурах до ~1150°C;

– Tribaloy Т-800 – сплав на основе системы Co–Cr–Mo–Si, упрочненный фазами Лавеса, выделяющимися при добавлении в кобальтовые сплавы молибдена и кремния; применяется для плазменно-порошковой наплавки на детали трения, работающие в коррозионно-активной среде с повышенным износом при температурах до 1000°C;

– ХТН-61 – сплав на основе кобальта, применяемый для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток ГТД с помощью напайки пластин и наплавки на контактные пло-

щадки; износостойкость и жаростойкость сплава обусловлены структурой, сформированной в процессе равновесной кристаллизации эвтектики кобальта с карбидом ниобия.

### Результаты

Микроструктуры отлитых сплавов представлены на рис. 1. Все исследованные материалы имеют гетерогенную структуру. В сплаве ВЖЛ2 основной является  $(\gamma+\gamma')$ -твердый раствор, присутствуют такие фазовые составляющие, как  $\mu$ -фаза, фаза Лавеса, боридная эвтектика и карбиды. Структура сплава ВКНА-2М представляет собой твердый раствор с включениями  $\beta$ -фазы на основе соединения  $NiAl$ , карбидов и боридов типа  $Me_3B_2$ . В кобальтовых сплавах В4К и X25H10B8 основными фазовыми составляющими, наряду с твердым раствором, являются карбиды и интерметаллидная фаза, однако в сплаве В4К эти фазовые составляющие более крупные, их количество увеличено.

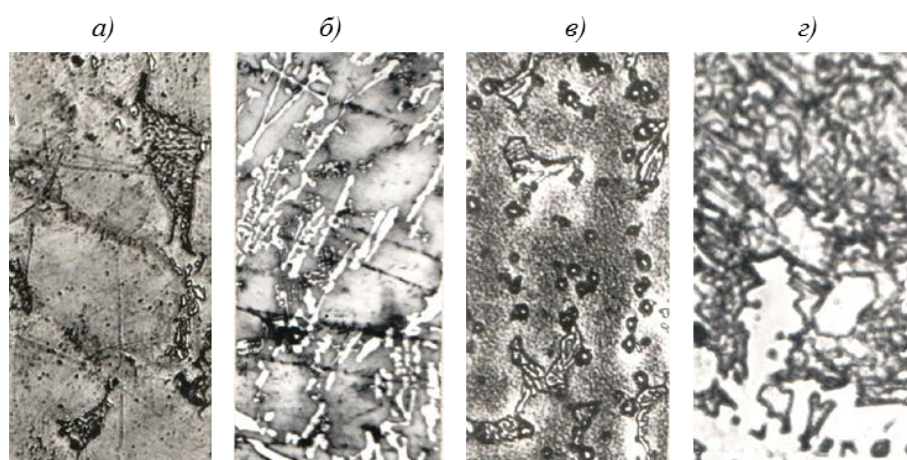


Рис. 1. Микроструктуры ( $\times 300$ ) исследованных сплавов марок ВКНА-2М (а), ВЖЛ2 (б), X25H10B8 (e), В4К (z)

Большинство зарубежных материалов, применяемых для упрочнения деталей трения, работающих в тяжелых условиях, представляют собой сплавы на основе кобальта или никеля с карбидным и интерметаллидным упрочнением. Сплавы на основе кобальта – стеллиты систем  $Co-Cr-W$  и  $Co-Cr-Mo$ , как правило, отличаются лучшим сочетанием эксплуатационных свойств (износостойкости, жаропрочности, коррозионной и эрозионной стойкости и др.). Сплавы, рассматриваемые в качестве аналогов, являются наиболее высокотемпературными из современных износостойких жаропрочных сплавов, применяемых для упрочнения деталей ГТД и восстановления их профиля после эксплуатации.

Сплав СМ-64, также как сплавы В4К и X25H10B8, представляет собой стеллит системы  $Co-Cr-W-C$ . Основой сплава является твердый раствор на кобальтовой основе, упрочненный карбидами хрома и вольфрама.

Износостойкий материал ХТН-61 – это эвтектический сплав на кобальтовой основе системы  $Co-NbC$  с объемной долей карбида ниобия в эвтектике до 18%. Для упрочнения мягкой и пластичной кобальтовой матрицы и повышения жаростойкости и коррозионной стойкости сплав дополнительно легирован хромом, вольфрамом, алюминием и молибденом. Все эти элементы растворены в кобальте или частично внедрены в карбиды ниобия [15].

Сплав Tribaloy T-800 представляет класс сплавов на основе кобальта системы Co–Cr–Mo–Si с интерметаллидным упрочнением или сплавов с фазами Лавеса – прочными интерметаллидными фазами, которые выделяются в кобальтовых сплавах вследствие добавления в них молибдена и кремния.

Микроструктуры сплавов ХТН-61 и Т-800 показаны на рис. 2 [14, 15].

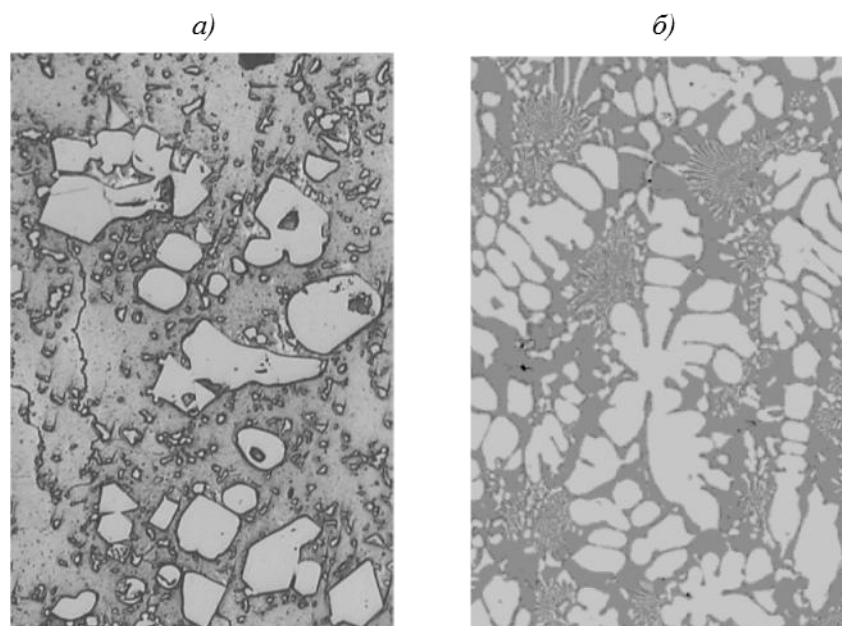


Рис. 2. Микроструктуры ( $\times 200$ ) износостойких сплавов на основе кобальта ХТН-61 (а) и Tribaloy T-800 (б)

Результаты исследований механических свойств выплавленных композиций и свойства материалов-аналогов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства износостойких сплавов

Сплав	Твердость HRC	Максимальная рабочая температура, °C	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
ВЖЛ2	46–48	900	600–650	0,5
В4К	50–52	1100	630–640 (250–280 при 1000°C)	0,4–0,8
X25H10B8	32–33	1000	320–380 (190–220 при 1000°C)	0,5
ВКНА-2М	34–37	1100	490–540 (240–300 при 1000°C)	0,5
ХТН-61	41–45	1100	–	–
СМ-64	44–45	~1150	330 (при 1000°C)	0–1,0
Tribaloy T-800	58	1000	$\leq 700$	0–1,0

По значениям максимальной рабочей температуры и уровню механических свойств разработанные во ФГУП «ВИАМ» сплавы близки к зарубежным аналогам. Вместе с тем значения твердости и прочности редко позволяют однозначно оценить износостойкость материала. С этой целью необходимо проведение испытаний в условиях, приближенных к реальным условиям работы конкретных деталей трения. В табл. 2 приведены значения среднего линейного износа и максимального локального повреждения сплавов, полученные при испытаниях образцов по разработанной методике в условиях динамического виброконтakтного нагружения.

Таблица 2

Сплав	Параметры износа $H_f/H_{max}$ , мкм, при температуре испытания, °С					
	20	700	800	900	1000	1100
ВЖЛ2	35/69	4/20	0/12	3/20	–	–
В4К	42/58	35/53	1/5	2/5	22/30	38/50
X25H10B8	150	9	0/40	0/80	0/300	–
ВКНА-2М	78	34/50	55/90	76/120	64/100	56/80

После проведения испытаний оценивали внешний вид и характер износа образцов исследуемых сплавов. В низкотемпературной области (до 700°С) характер износа, вид поверхностей трения, наличие продуктов износа для всех испытанных материалов приблизительно одинаков.

По степени убывания износостойкости в диапазоне температур 800–1100°С исследованные материалы можно расположить в следующей последовательности: В4К (наилучшая), ВЖЛ2, X25H10B8, ВКНА-2М.

Наиболее интенсивно процессу фреттинг-коррозии материалы подвержены в области относительно низких температур (до 700°С). Поверхности трения сплавов при этих температурах имеют, как правило, ярко выраженный волнистый рельеф. По мере повышения температуры рельеф поверхности несколько сглаживается, поверхности покрываются слоем оксидов, служащих твердой смазкой в условиях высокотемпературной фреттинг-коррозии.

Вид дорожек трения образцов из сплавов В4К и ВКНА-2М после проведения испытаний представлен на рис. 3.

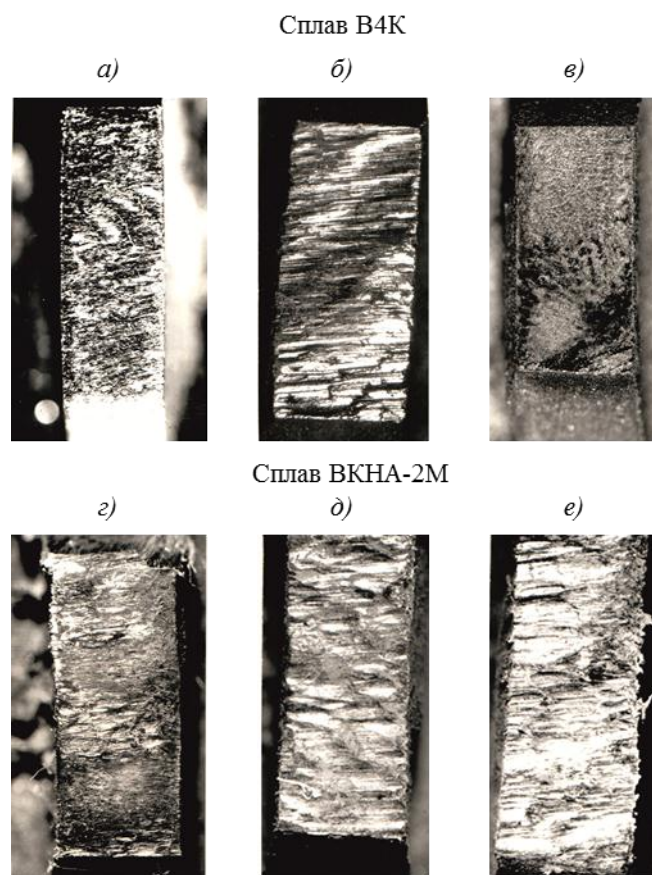


Рис. 3. Вид рабочих поверхностей образцов из сплавов ВКНА-2М и В4К после испытаний в режиме виброконтakтного динамического нагружения при температуре 20 (а, г), 700 (б, д) и 1000°С (в, е)

При проведении испытаний косвенно можно судить об окалиностойкости исследуемых сплавов по наличию цветов побежалости на поверхности, появлению рыхлых оксидов. По интенсивности окисления поверхности исследуемые сплавы можно расположить в следующей последовательности: ВКНА-2М (наименьшая), ВЖЛ2, Х25Н10В8, В4К.

Анализируя результаты испытаний износостойких материалов в режиме виброконтактного динамического нагружения, следует сделать вывод о том, что в области высоких температур 800–1100°C материалы имеют экстремум, свидетельствующий об оптимальной температуре их эксплуатации. В этих условиях достигается минимальный линейный износ ( $H_l$ ) и наименьшая повреждаемость по параметру  $H_{max}$ .

Оптимальными температурами эксплуатации износостойких сплавов следует считать:

- для сплава В4К: 800, 900, 1000, 1100°C;
- для сплава ВЖЛ2: 800, 900°C;
- для сплава Х25Н10В8: 700, 800, 900°C;
- для сплава ВКНА-2М: 700, 800, 1100°C.

### Обсуждение и заключения

Из исследованных материалов наиболее высокими триботехническими характеристиками в режиме динамического виброконтактного нагружения обладает сплав В4К – может работать в диапазоне температур 800–1100°C. При температуре 1100°C также может работать сплав ВКНА-2М, износостойкость которого наименее зависит от рабочей температуры.

Наибольшей жаростойкостью, в том числе при температуре 1100°C, обладает сплав ВКНА-2М. Меньшая износостойкость сплава может быть связана с образованием на поверхности трения сплава ВКНА-2М порошкообразных оксидов, включающих значительное количество оксидов алюминия, что приводит к абразивному износу исследуемых пар трения.

Высокая износостойкость сплавов В4К и ВЖЛ2 объясняется образованием на поверхности трения оксидных пленок, обладающих хорошей адгезией к подложке, которые при высоких температурах играют роль твердых смазок, повышая фреттингостойкость материалов.

В целом сплавы могут быть рекомендованы для проведения работ по их технологическому опробованию в реальных условиях при температурах до 900 (сплав Х25Н10В8) и 1100°C (сплавы В4К и ВКНА-2М) и составить конкуренцию для зарубежных материалов-аналогов.

Необходимо учитывать, что выбор износостойкого материала и способа его нанесения производится индивидуально для каждого двигателя в зависимости от условий эксплуатации, марки основного материала лопатки и ее конструкции, технологических особенностей изготовления и ремонта и множества других факторов [4].

### ЛИТЕРАТУРА

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. Мигунов В.П., Чатынян Л.А., Иванов Е.В., Антонова Г.С., Соловьева Т.А. Износостойкие и антифрикционные материалы для узлов трения // Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 71–73.

3. Петрик И.А., Перимилловский И.А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Технологические системы. 2001. №3 (9). С. 90–92.
4. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Сравнительные характеристики износостойких сплавов для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. №9 (76). С. 102–104.
5. Дмитриева Г.П., Черепова Т.С., Косорукова Т.А., Ничипоренко В.И. Структура и свойства износостойкого сплава на основе кобальта с карбидом ниобия // Металлофизика и новейшие технологии. 2015. Т. 37. №7. С. 973–986.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
7. Бунтушкин В.П. Исследование и разработка жаростойкого интерметаллидного сплава и покрытий для теплонагруженных деталей авиационных газовых турбин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1976. 26 с.
8. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
9. Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №5. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
10. Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Рогалев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки // Вопросы материаловедения. 2013. №4 (76). С. 98–107.
11. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
12. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
13. Компания «Rolled Alloys»: офиц. сайт. URL: <http://www.rolledalloys.com/alloys> (дата обращения: 15.07.2016).
14. Компания «Kennametal Stellite»: офиц. сайт. URL: <http://www.stellite.com/> (дата обращения: 15.07.2016).
15. Пейчев Г.И., Милосердов А.Б., Андрейченко Н.В. Исследование легкоплавких эвтектик в микроструктуре износостойкого сплава ХТН-61 // Вестник двигателестроения. 2012. №1. С. 211–214.
16. Тихомирова Т.В., Гайдук С.В. Исследование методом CALPHAD влияния отношения вольфрама к кремнию на фазовый состав и характеристические температуры кобальтового сплава // Вестник двигателестроения. 2014. №2. С. 206–210.