

УДК 620.1

Д.П. Фарафонов<sup>1</sup>, В.П. Мизунов<sup>1</sup>, Р.Ш. Алешина<sup>1</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ БАНДАЖНЫХ ПОЛОК РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН ГТД**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-24-30

*Представлены результаты исследований триботехнических характеристик жаропрочных износостойких сплавов на основе никеля и кобальта, разработанных во ФГУП «ВИАМ». Разработана методика и проведены сравнительные испытания сплавов в условиях, моделирующих работу контактных площадок бандажных полок рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей. Определены оптимальные температуры эксплуатации износостойких сплавов.*

*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:** коэффициент трения, фреттинг-коррозия, бандажные полки рабочих лопаток, износостойкость, наплавка.

*Results of tribotechnical characteristics research of heat resistant and wear-resistant alloys on the basis of nickel and cobalt developed by FSUE «VIAM» are provided. The test procedure is developed and comparison tests of alloys are carried out in conditions modeling the contact pads of the gas turbine engines blade shrouds. Optimal temperatures of wear-resistant alloys operation are determined.*

*This work was carried out in the context of the integrated scientific directions: 9.7. «High-temperature deformable alloys and composite materials strengthened by high-melting metal fibers and particles, abraded sealing materials» and 10.3. «Technologies of atomization for fine-dispersed high-quality powders production of different metal alloys for additive technologies» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** friction coefficient, fretting corrosion, rotor blade shroud, wear resistance, 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**

Повышение надежности и долговечности узлов трения современных и перспективных изделий связано с вопросами износостойкости контактирующих поверхностей. Особенно актуальной следует считать эту проблему применительно к газотурбинным двигателям (ГТД), которые работают в динамических условиях, характеризующихся сложными изменениями во времени скоростей, нагрузок, свойств рабочих сред и температурного режима. При этом доминирующее влияние на износостойкость контактирующих поверхностей оказывают нестационарные условия эксплуатации, которые вызывают резкое изменение параметров нагружения, а следовательно, преждевременный отказ узла трения.

Ресурс авиационных двигателей определяется долговечностью наиболее ответственных деталей горячего тракта ГТД, таких как диски, рабочие и

сопловые лопатки турбины, срок службы которых во многом зависит от износа контактирующих поверхностей. Бандажные полки турбинных лопаток работают, как правило, в условиях высоких температур и изнашиваются в результате динамического контактного нагружения, включающего удар со скольжением, вызванного вибрацией деталей и узлов двигателей [2–8].

Для решения практических задач, связанных с исследованием возможности применения существующих и разработкой перспективных жаропрочных материалов для работы в этих условиях, необходимо проведение исследований триботехнических характеристик пар трения, работающих при динамических контактных нагружениях и повышенных нестационарных температурах.

Изучение триботехнических характеристик пар трения и сравнительная оценка износостойкости различных материалов могут осуществляться

на лабораторных установках, позволяющих изучать закономерности изнашивания в зависимости от конкретных параметров нагружения; на специальных стендах (полунатурных установках), позволяющих моделировать условия, близкие к эксплуатационным; на реальном двигателе, где бандажные полки подвержены повышенному износу.

Испытания на реальном двигателе длительные и дорогостоящие. Определение триботехнических характеристик пар трения в лабораторных условиях имеет несомненное преимущество, так как лабораторные испытания позволяют отдельно и независимо определить влияние внешних факторов (характера и скорости взаимного перемещения, динамики нагружения и температуры) на процессы трения и изнашивания.

Задачей данной работы являлось исследование в лабораторных условиях интенсивности изнашивания материалов, разработанных во ФГУП «ВИАМ» для применения в качестве упрочняющих покрытий деталей трения, работающих в экстремальных условиях, в том числе для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД в широком диапазоне изменения температур (от 800 до 1100°C) и значений давления (от 20 до 70 МПа), – с целью получения данных для прогнозирования работы материалов на длительный ресурс и выбора состава для получения металлопорошковой композиции жаропрочного сплава на его основе, изготавливаемого методом атомизации, для проведения дальнейших работ по ремонту и упрочнению рабочих лопаток турбин высокого давления методом лазерной наплавки в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1, 9–13].

#### Материалы и методы

В данной статье представлены результаты исследований триботехнических характеристик жаропрочных материалов на основе никеля и кобальта, разработанных во ФГУП «ВИАМ» [5, 14, 15]. Сплавы марок ВЖЛ2, ВКНА-2М, В4К и Х25Н10В8 применяют для упрочнения деталей трения, работающих в экстремальных условиях, в том числе для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД. Основные свойства сплавов представлены в таблице.

Исходя из условий работы бандажных полок лопаток триботехнические характеристики износостойких жаропрочных материалов, применяемых для повышения их ресурса работы, оценивали в двух режимах нагружения:

- динамического виброконтрастного нагружения;
- однонаправленного скольжения.

Для определения триботехнических характеристик жаропрочных материалов в условиях виброконтрастного динамического нагружения разработаны методика и испытательное оборудование для ее осуществления. Испытания выполняли на цилиндрических образцах с торцевыми рабочими поверхностями, которые получали методом точного литья по выплавляемым моделям. В качестве держателей образцов использовали рабочие лопатки серийного газотурбинного двигателя. Испытываемые образцы приваривали к бандажным полкам лопаток-держателей аргоно-дуговой сваркой. Образцы при испытаниях работают по принципу «плоскость–плоский ползун». Испытания проводили при следующих параметрах трибосопряжения:

- амплитуда взаимного перемещения образца относительно контробразца –  $A=200\pm 10$  мкм;
- статическая нагрузка в контакте –  $P_{ст}=180$  Н;
- максимальное значение динамической нагрузки в контакте –  $P_{дин}=250$  Н;
- площадь контакта –  $S=10$  мм<sup>2</sup>;
- суммарная удельная нагрузка в контакте –  $P_{сум}=30$  МПа;
- база испытаний –  $N=100000\pm 20$  циклов;
- частота взаимного перемещения в контакте –  $n=106\text{--}112$  Гц;
- температура испытаний 20; 700; 800; 900; 1000 и 1100°C.

При испытании материалов в режиме однонаправленного трения скольжения использовали кольцевые образцы с площадью рабочей поверхности 3 см<sup>2</sup>. Испытания выполняли на установке И-47 при температуре 20–1100°C, скорости скольжения 0,3–1 м/с, удельной нагрузке 2–60 МПа.

Экспериментально установлено, что метод измерения износа по изменению массы образцов не дает достоверных результатов при температуре >500°C, так как величина износа соизмерима с изменением массы образцов под действием окисления, а по абсолютной величине не превышает

Свойства износостойких сплавов

Сплав	Основа	Твердость HRC	Максимальная рабочая температура, °C	Предел прочности при растяжении, МПа	Тип упрочнения (основные упрочняющие фазы)
ВЖЛ2	Ni	46–48	900	600–650	Фаза Лавеса, $\mu$ -фаза, боридная эвтектика, карбиды
В4К	Ni–Cr–W–C	50–52	1100	630–640	Карбиды
Х25Н10В8	Ni–Cr–W–C	32–33	1000	320–380	Карбиды
ВКНА-2М	Ni–Al	34–37	1100	490–540	Карбиды, бориды

2 мг. Наиболее эффективным в этих условиях оказывается определение линейного износа профилографированием, которое достаточно полно отражает не только абсолютную величину износа образца, но и характер изменения рельефа поверхности. Впадины и выступы, образующиеся благодаря переносу материала и местной пластической деформации, отражают способность материала сопротивляться износу.

Проведенный статический анализ профилограмм дорожек трения позволил предложить несколько параметров для оценки износа образцов:

$H_h$  – средний линейный износ, характеризующий изменение рельефа рабочей поверхности и потерю массы в результате контактного взаимодействия;

$H_\sigma$  – среднее квадратическое отклонение точек рельефа дорожки трения, характеризующее неравномерность рельефа;

$H_{\max}$  – максимальное локальное повреждение рабочей поверхности (в пределах дорожки трения).

Физический смысл показателей износостойкости иллюстрирует рис. 1. Профилографирование дорожек трения производили согласно ГОСТ 23.211–80. Запись профилограмм осуществляли на специально сконструированном приборе, позволяющем снимать профилограмму при больших вертикальных перемещениях индентора:

– средний линейный износ  $H_h$  по одной профилограмме вычисляли по формуле

$$H_{h_i} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n};$$

– средний линейный износ образцов по всем записанным профилограммам равен

$$H_h = \frac{\sum_{i=1}^m H_{h_i}}{m};$$

– среднее квадратическое отклонение точек рельефа дорожки трения  $H_\sigma$  (неравномерность

рельефа) по одной профилограмме вычисляли по формуле

$$H_{\sigma_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y)^2}{n}},$$

а по всем записанным профилограммам – по формуле

$$H_\sigma = \frac{\sum_{i=1}^m H_{\sigma_i}}{m},$$

где  $y_i$  – ордината некоторой точки рельефа дорожки трения по профилограмме;  $y$  – среднее арифметическое значение  $y_i$ ;  $n$  – количество точек рельефа профилограмм, взятых для расчета (не менее 30);  $m$  – количество профилограмм, снятых на одном образце.

Повреждение дорожек трения ( $H_{\max}$ ) может быть двух видов:

- локальный вырыв поверхности (в этом случае  $H_{\max}$  имеет положительный знак);
- налипание на дорожке трения (в этом случае  $H_{\max}$  имеет, соответственно, отрицательный знак).

### Результаты

На рис. 2 приведены результаты исследований трибологических свойств жаропрочных материалов в режимах виброконтактного динамического нагружения.

В низкотемпературной области (температура до 700°C) характер износа, вид поверхностей трения, наличие продуктов износа для всех испытанных материалов приблизительно одинаков.

В высокотемпературной области характер изнашивания принципиально изменяется и различен для каждого конкретного сплава. В диапазоне температур 700–1100°C при виброконтактном динамическом нагружении имеет место процесс высокотемпературной фреттинг-коррозии, который приводит к износу и повреждаемости рабочих поверхностей.

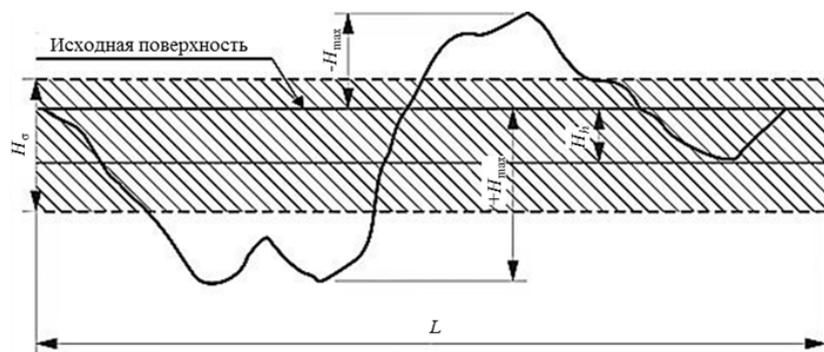


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая физический смысл параметров износа ( $H_h$ ,  $H_\sigma$ ,  $H_{\max}$ )

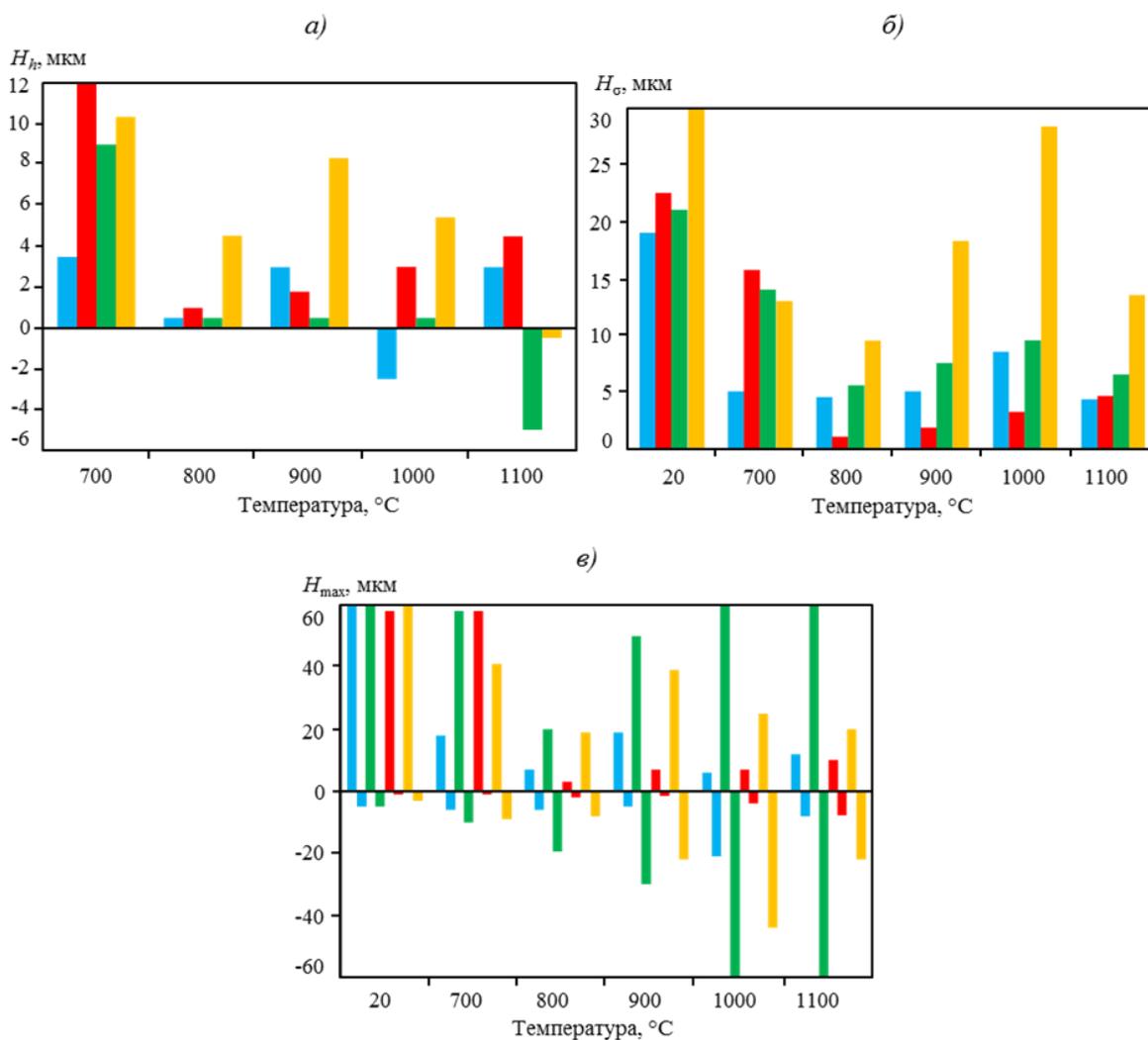


Рис. 2. Значения параметров  $H_h$  (а),  $H_\sigma$  (б) и  $H_{max}$  (в) в условиях виброконтактного динамического нагружения при различных температурах рабочей среды для жаропрочных сплавов ВЖЛ2 (■), В4К (■), Х25Н10В8 (■) и ВКНА-2М (■)

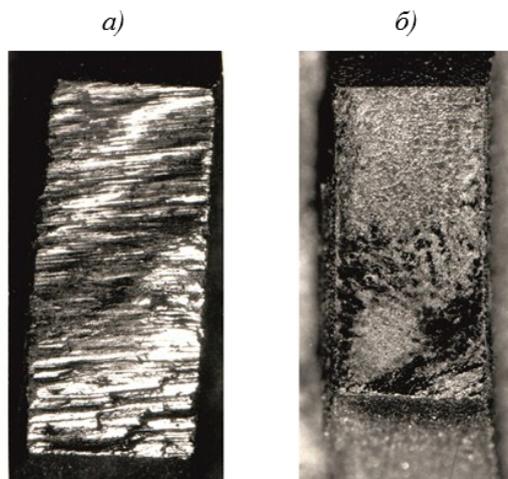


Рис. 3. Вид рабочих поверхностей образцов из сплава В4К после испытаний в режиме виброконтактного динамического нагружения при температуре 700 (а) и 1000°С (б)

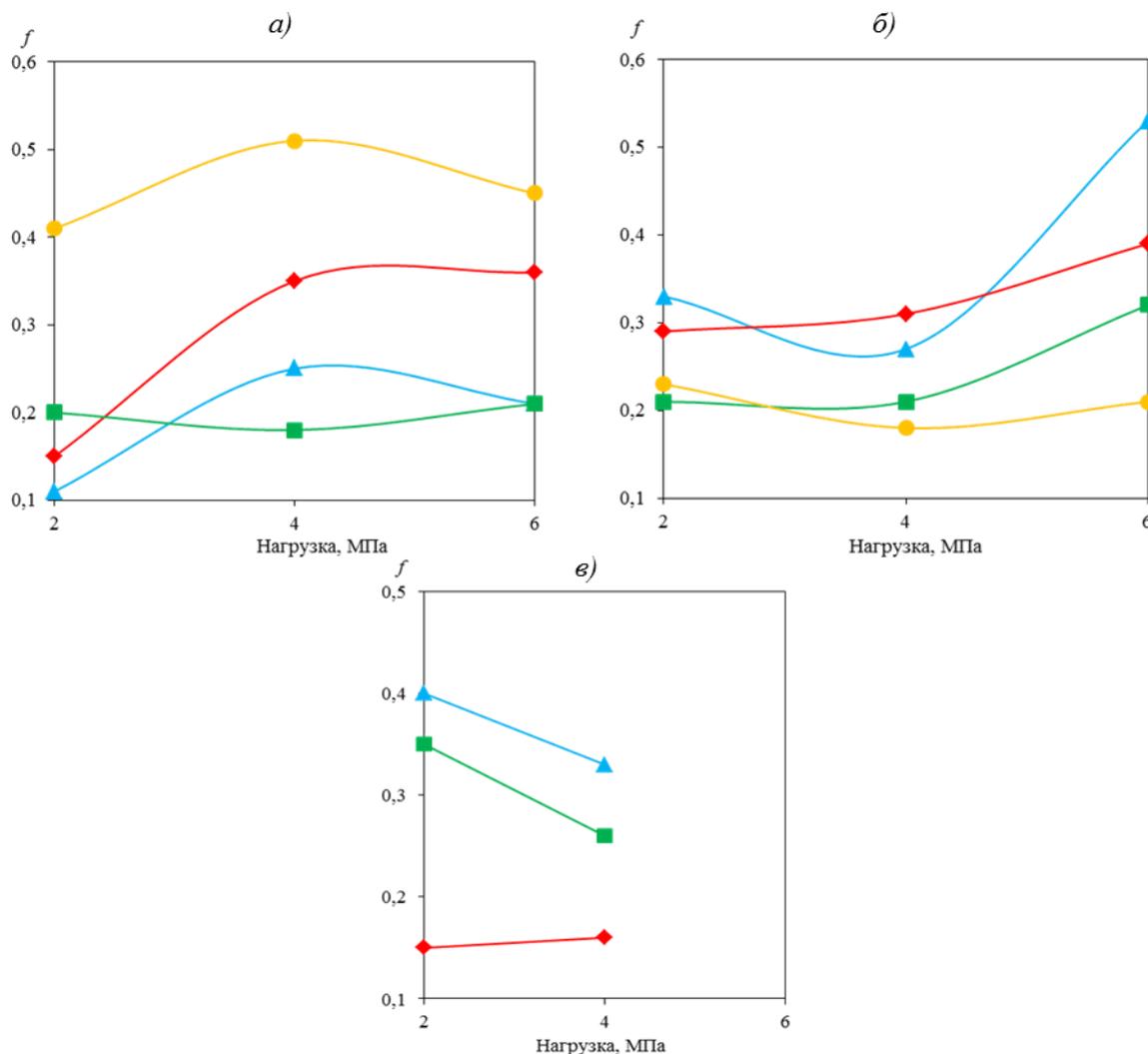


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения ( $f$ ) от нагрузки при температурах 900 (а), 1000 (б) и 1100°C (в) в условиях однонаправленного скольжения для жаропрочных сплавов ВКНА-2М (▲), ВЖЛ2 (◆), X25N10V8 (■) и В4К (●)

По степени убывания износостойкости в диапазоне температур 800–1100°C исследованные материалы можно расположить в следующей последовательности: В4К (наилучшая), ВЖЛ2, X25N10V8, ВКНА-2М.

В процессе испытаний наблюдали образование продуктов износа в виде скоплений «фрагментированного» материала, состоящих из раскрошившихся оксидов с примесью неокисленных чешуек металла. Наиболее интенсивно процессу фреттинг-коррозии материалы подвержены в области относительно низких температур (до 700°C). 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 (рис. 3).

Второй этап исследований трибологических

свойств износостойких материалов включал проведение испытаний при однонаправленном трении скольжения, поскольку эти сплавы применяются в качестве материала деталей трения.

В условиях однонаправленного трения не получено единой закономерности влияния на трибологические свойства материалов температуры при постоянной нагрузке или нагрузки при постоянной температуре (рис. 4). Все материалы ведут себя по-разному. Сплав ВЖЛ2 удовлетворительно работает в диапазоне температур 900–1100°C при нагрузке 2 МПа, а при нагрузках 4 и 6 МПа и температуре 1100°C – не работоспособен (материал образца размазывается по контробразцу). Сплав ВКНА-2М показывает довольно высокие значения коэффициента трения в исследуемом диапазоне температур при всех нагрузках. Минимальные значения коэффициента трения при исследованных температурах и нагрузках получены для сплава В4К. При всех различиях в поведении износостойких материалов объединяет их то,

что они не работоспособны при 1100°C, когда удельная нагрузка составляет 6 МПа.

Косвенно, при проведении испытаний, 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 виброконтантного 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 ( $H_f$ ) и наименьшая повреждаемость по параметру  $H_{max}$ .

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.

#### Обсуждение и заключения

По результатам проведенных испытаний оптимальным температурами эксплуатации износостойких сплавов следует считать:

Сплав	Температура, °С
В4К	800, 900, 1000, 1100
ВЖЛ2	800, 900
Х25Н10В8	700, 800, 900
ВКНА-2М	700, 800, 1100.

Сплав В4К оказался единственным материалом, который обладает высокими триботехническими характеристиками при испытании как в режиме динамического виброконтантного нагружения, так и при однонаправленном скольжении. Он может быть рекомендован для узлов трения, работающих в диапазоне температур 800–1100°C. При использовании сплава в качестве материала деталей трения, длительно работающих при 1100°C, необходима защита сплава от окисления.

Полученные результаты лабораторных исследований материалов в режиме виброконтантного динамического нагружения полностью согласуются с результатами стендовых испытаний. Это подтверждает надежность разработанной методики в оценке поведения материалов и возможность ее использования для прогнозирования работы сплавов при длительных ресурсах.

Для дальнейших исследований и разработки порошковой композиции износостойкого сплава для ремонта и упрочнения бандажных полок рабочих лопаток методом лазерной наплавки целесообразно применение материалов типа В4К – на основе системы Co–Cr–W–C, обладающих оптимальным сочетанием свойств как в режиме динамического виброконтантного нагружения, так и при однонаправленном скольжении при температурах до 1100°C. Необходимо также проведение исследований, направленных на оптимизацию состава жаропрочного износостойкого материала на основе системы Co–Cr–W–C, с целью повышения жаростойкости и стойкости к трещинообразованию покрытия, получаемого методом лазерной наплавки.

#### 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. Петрик И.А., Перимировский И.А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // *Технологические системы*. 2001. №3 (9). С. 90–92.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Пейчев Г.И., Замковой В.Е., Андрейченко Н.В. Разработка аналога износостойкого сплава ХТН-61 повышенной жаростойкости для газотурбинных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. №8 (44). С. 11–13.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
  12. Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Роголев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки // Вопросы материаловедения. 2013. №4 (76). С. 98–107.
  13. 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.
  14. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. №1. С. 32–34.
  15. Соловьева Т.А., Задыбина Т.Б., Бунтушкин В.П. Применение износ- и жаростойких сплавов для упрочнения лопаток ГТД // Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 25–26.