
Научная статья

УДК 621.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-3-12

ЖАРОСТОЙКОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe–Cr–Al–Y ДЛЯ СОТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Скугорев¹, Д.А. Мельникова¹, Ю.В. Столянков¹, А.С. Ярошенко¹

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

Аннотация. Статья посвящена изучению жаростойкости и технологической пластичности нового жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al–Y. Разрабатываемый сплав системы Fe–Cr–Al–Y предназначен для изготовления сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей с рабочей температурой до 1100 °С. Данный сплав призван заменить жаропрочные сплавы марок ЭИ435 и ЭИ868, используемые в настоящее время для изготовления сотовых уплотнений. По показателям жаростойкости при 1100 °С сплав системы Fe–Cr–Al–Y превосходит сплавы-аналоги ЭИ435 и ЭИ868 в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: жаростойкий сплав, фехраль, легирование иттрием, сотовые уплотнения, истираемый уплотнительный материал

Для цитирования: Скугорев А.В., Мельникова Д.А., Столянков Ю.В., Ярошенко А.С. Жаростойкость и технологическая пластичность сплава системы Fe–Cr–Al–Y для сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-3-12.

Scientific article

HEAT RESISTANCE AND TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF AN ALLOY OF THE Fe–Cr–Al–Y SYSTEM FOR HONEYCOMB SEALS IN THE FLOW PATH OF GAS TURBINE ENGINES

A.V. Skugorev¹, D.A. Melnikova¹, Yu.V. Stolyankov¹, A.S. Yaroshenko¹

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

Abstract. The work is devoted to the study of heat resistance and technological plasticity of a new heat-resistant alloy of the Fe–Cr–Al–Y system. The alloy of the Fe–Cr–Al–Y system being developed is intended for the manufacture of honeycomb seals for the flow path of gas turbine engines with an operating temperature of up to 1100 °C. This alloy is intended to replace heat-resistant alloys ЭИ435 and ЭИ868, which are currently used for the manufacture of honeycomb seals. In terms of heat resistance at 1100 °C, the alloy of the Fe–Cr–Al–Y system is 1.5–2 times superior to alloys analogs ЭИ435 and ЭИ868.

Keywords: heat-resistant alloy, fechrall, yttrium alloying, honeycomb seals, abrasible sealing material

For citation: Skugorev A.V., Melnikova D.A., Stolyankov Yu.V., Yaroshenko A.S. Heat resistance and technological plasticity of an alloy of the Fe–Cr–Al–Y system for honeycomb seals in the flow path of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-3-12.

Введение

В настоящее время для изготовления сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей (ГТД) в России и за рубежом применяются устаревшие сплавы на основе систем Ni–Cr и Ni–Cr–Al, такие как ЭИ435, ЭП868, Hastelloy X, Haynes 214 и др. Для изготовления сотовых уплотнений используется холоднокатаная лента толщиной от 0,1 до 0,3 мм. Сотовые уплотнения из этих сплавов не удовлетворяют современным требованиям к ГТД и характеризуются рабочими температурами до 1000 °С с ограниченным ресурсом из-за низкой жаростойкости тонких ячеек сот и их частого прогорания в условия работы турбины.

Повышение жаростойкости и ресурса сотовых уплотнений возможно при использовании для изготовления сотовых конструкций лент из жаростойких сплавов, таких как сплавы системы Fe–Cr–Al–Y, характеризующихся повышенной стойкостью к высокотемпературному окислению, особенно в случае циклических колебаний температуры – от 700 до 1200 °С.

Сплавы системы Fe–Cr–Al–Y обладают по сравнению со сплавами ЭИ435, ЭИ868 и Inconel 718 значительно более высокими характеристиками жаростойкости. Сплавы данной системы легирования работоспособны при температурах до 1400 °С и нашли применение для изготовления тонких волокон (толщиной <50 мкм) и пористых металлических уплотнений из них для проточной части компрессора и турбины ГТД (материалы марок Feltmetal (США) и ВИПВМ (Россия, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) [1–4]).

Главной целью проводимых исследований и технологических разработок является адаптация специализированного жаростойкого сплава, применяемого для истираемых уплотнений ГТД, для изготовления сотовых уплотнений, для чего в настоящее время используются сплавы, имеющие иную специфику применения.

На данном этапе основной задачей является выбор состава сплава системы Fe–Cr–Al–Y, обеспечивающего максимальную жаростойкость материала при температуре 1100 °С, а также проведение исследований технологической пластичности материала в литом состоянии. Полученные данные о пластичности материала послужат основой для выбора режимов горячей деформации для получения качественных горячедеформированных полуфабрикатов. Работы по разработке технологии получения холоднокатаной ленты для сотовых уплотнений из нового жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al–Y продолжаются.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5, 6].

Материалы и методы

По данным отечественных и зарубежных научно-технических источников, сотовые конструкции находят широкое применение в качестве уплотнений радиальных зазоров в проточной части турбин и компрессоров ГТД. Сотовые уплотнения позволяют существенно уменьшить величину радиального зазора и сократить количество утечек рабочего газа, так как они допускают скольжение периферийных торцов рабочих лопаток по сотам. Это связано с тем, что сотовая поверхность значительно (до 10 раз) уменьшает площадь контакта по сравнению с обычным гладким уплотнением.

Сотовые уплотнения чаще всего изготавливают методом гибки из тонких лент из жаропрочных и жаростойких сплавов, толщина которых обычно не превышает 0,3 мм, и наносят на статорные детали методом пайки. Меньшая толщина стенок сот позволяет сократить износ и перегрев лопаток при их контактном взаимодействии, однако при меньшей толщине уменьшается и стойкость сотовых конструкций в рабочей газовой среде. Основным недостатком сотовых уплотнений является их частое прогорание и деформация ячеек в жестких условиях работы турбины авиационных ГТД (рис. 1).



Рис. 1. Сотовое уплотнение после эксплуатации в составе газотурбинного двигателя

Максимальные рабочие температуры сотовых уплотнений могут достигать 1100 °С. В зависимости от условий работы, соты изготавливают из различных сплавов – например, из нержавеющей стали, жаростойких никелевых или кобальтовых сплавов марок Х20Н80, ХН75МБТЮ, Hastelloy-Х и др.

В России для изготовления высокотемпературных сотовых конструкций чаще всего применяют ленты из сплавов на основе никеля с большим содержанием хрома (Х20Н80, ХН60ВТ, ХН78Т), максимальная рабочая температура которых составляет 950–1000 °С [7].

За рубежом для изготовления наиболее высокотемпературных сотовых уплотнений применяют жаропрочные сплавы на никелевой основе марок Hastelloy-Х (системы Ni–Cr–Fe–Mo), Haynes 230 (системы Ni–Cr–W–Mo), Haynes 214 (системы Ni–Cr–Fe–Al–Y). Температура эксплуатации сотовых конструкций из этих сплавов также не превышает 950–1000 °С.

Недостаточный уровень жаростойкости существующих сотовых конструкций при температурах эксплуатации >1000 °С обуславливает проведение большого количества исследований, направленных на улучшение их эксплуатационных характеристик. В основном для улучшения стойкости сотовых уплотнений при экстремальных условиях эксплуатации предлагается использование различных наполнителей ячеек сот, а для изготовления лент – новых сплавов. Введение наполнителей на основе порошков жаростойких сплавов, применение высокотемпературных припоев и неметаллических материалов позволяет повысить жаростойкость сотовых уплотнений, однако при этом наблюдается снижение их истираемости, а также увеличивается трудоемкость изготовления. Оптимальным вариантом является использование новых сплавов для изготовления лент. Сложность реализации данного направления в основном заключается в выборе состава сплава, обеспечивающего сочетание стойкости сплава к высокотемпературному окислению с технологической пластичностью. Уровень пластичности должен быть достаточным, чтобы обеспечить возможность получения в промышленных условиях тонких лент и сотовых конструкций из них.

Повышение жаростойкости сплавов в основном достигается благодаря улучшению характеристик образующихся на поверхности сплавов защитных оксидных пленок,

препятствующих объемной диффузии реагентов. Легирование сплавов редкими металлами, такими как Hf, Y, Zr, La, Ce и др., а также металлами платиновой группы (Pt, Rh, Pd, Ru, Ir) [8] позволяет значительно повысить стойкость сплавов систем Me–Cr–Al к высокотемпературному окислению.

Положительное влияние редкоземельных металлов (РЗМ) на стойкость к высокотемпературному окислению волокон из сплавов на основе систем Me–Cr–Al заключается в повышении адгезии и защитных свойств образующейся на их поверхности оксидной пленки.

Основные микролегирующие элементы, обеспечивающие улучшение адгезии оксидной пленки при изотермическом и циклическом окислении сплавов систем Me–Cr–Al, – это Hf, La, Ce, Zr, Y, Yb, Th, Er [9–13]. При этом сплавы, содержащие в своем составе Y и Hf в количестве <1 % (по массе), как правило, стойки к окислению при более высоких температурах.

Наибольшей рабочей температурой среди промышленных сплавов системы Fe–Cr–Al характеризуются дисперсно-упрочненные сплавы с оксидным упрочнением [14, 15]. Основное применение такие сплавы нашли в аэрокосмической промышленности и ядерной энергетике.

Исследование сплавов системы Fe–Cr–Al показало, что при содержании алюминия ~5 % (по массе) сплавы по жаростойкости значительно превосходят нихромы [16]. Для нужд отечественного машиностроения разработаны сплавы марок X23Ю5 и X23Ю5Т, которые нашли широкое применение в качестве резистивных материалов для нагревательных устройств.

В рамках данной работы проведена отработка режимов выплавки слитков экспериментальных составов сплава системы Fe–Cr–Al–Y и получены четыре экспериментальных состава для исследования влияния химического состава сплава на показатели его жаростойкости. Выплавку слитков проводили в вакуумной индукционной печи с последующим формированием слитков цилиндрической формы диаметром 90 мм. Методами атомно-эмиссионного и газового анализа определяли химический состав слитков, который для экспериментальных композиций представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав слитков экспериментальных составов сплава системы Fe–Cr–Al–Y

| Условный номер состава | Химический состав, % (по массе) | | | | | | | |
|------------------------|---------------------------------|------|-------------|------|------|-------|----------|--------|
| | легирующих элементов | | | | | | примесей | |
| | Fe | Cr | Al + Ti + Y | Mn | Si | C | S | N |
| 1 | Основа | 21,6 | 5,397 | 0,30 | 0,59 | <0,08 | 0,0014 | 0,0033 |
| 2 | | 23,6 | 6,020 | 0,29 | 0,57 | | 0,0009 | 0,0020 |
| 3 | | 22,8 | 6,100 | 0,28 | 0,65 | | 0,0007 | 0,0038 |
| 4 | | 24,1 | 6,202 | 0,28 | 0,23 | | 0,0007 | 0,0038 |

Помимо содержания хрома экспериментальные составы отличались друг от друга содержанием алюминия и иттрия. В частности, в составе 2 содержание иттрия значительно превышало его содержание в трех других составах.

Из полученных слитков изготовлены цилиндрические образцы типа К10 для определения жаростойкости по ГОСТ 6130–71. Жаростойкость определяли после выдержки образцов в печи при температуре 1100 °С в течение 100 ч. Привес и жаростойкость определяли по формулам

$$\text{Привес} = \frac{m_k - m_n}{S},$$

$$\text{Жаростойкость} = \frac{m_k - m_n}{S \cdot t},$$

где m_n – масса образца до испытаний, г; m_k – масса образца после испытаний, г; S – площадь образца, м^2 ; t – продолжительность выдержки образца, ч.

По результатам определения жаростойкости экспериментальных составов сплава системы Fe–Cr–Al–Y выбран состав, обеспечивающий максимальную жаростойкость при 1100 °С.

По отработанной технологии изготовлены слитки выбранного состава. Для получения требуемого структурного состояния слитка для последующей горячей деформации, слитки переплавляли по различным технологиям, таким как вакуумный дуговой переплав (ВДП) и вакуумно-индукционный переплав (ВИ-переплав), с формированием слитка равноосной кристаллизации в керамической конической форме с прибыльной надставкой. Внешний вид полученных слитков приведен на рис. 2.



Рис. 2. Слитки из сплава системы Fe–Cr–Al–Y после вакуумного дугового переплава диаметром 130 мм (а) и вакуумно-индукционного переплава с равноосной кристаллизацией с неснятой прибыльной надставкой (б)

Для определения способности исследуемых материалов к горячей обработке давлением определяли технологическую пластичность при сжатии. Для этого из полученных слитков изготовлены цилиндрические образцы для испытания на сжатие при повышенных температурах, у которых продольная ось параллельна продольным осям слитков. Испытания образцов на сжатие проводили на лабораторном гидравлическом прессе с усилием 63 тс в интервале температур, соответствующем температурному интервалу горячей деформации сталей и сплавов на основе железа. По результатам испытаний при каждой температуре определяли технологическую пластичность при сжатии – относительную степень деформации, при которой не происходит разрушения образца.

Ковку слитков проводили на вертикальном гидравлическом прессе [17, 18] на плоских бойках, прокатку сутонок на горячекатаные листы толщиной 3–4 мм – на стане горячей прокатки Smitz [19].

Результаты и обсуждение

По результатам проведенной экспериментальной отработки режима выплавки слитков из сплава системы Fe–Cr–Al–Y был выбран режим (температуры перегрева расплава, плавки и слива; последовательность и метод введения шихтовых материалов и лигатур (особенно Y)), обеспечивающий хорошее усвоение расплавом основных легирующих элементов и добавок.

В результате отработки режима вакуумно-дугового переплава слитков обеспечено проведение плавки в полностью автоматическом режиме и получение слитков с минимальной усадочной раковинной и без внутренних дефектов (трещин).

Полученные слитки хорошо обрабатываются резанием. При комнатной температуре сплав системы Fe–Cr–Al–Y крайне хрупок.

Полученные экспериментальные составы сплава системы Fe–Cr–Al–Y имеют различные показатели жаростойкости. На рис. 3 приведена зависимость привеса образцов из слитков различных экспериментальных составов от продолжительности выдержки образцов в печи. Наибольший привес имеет состав с наибольшим содержанием иттрия. Несмотря на пониженное содержание хрома, наименьший привес имеет состав 1 благодаря оптимальному содержанию остальных легирующих элементов.

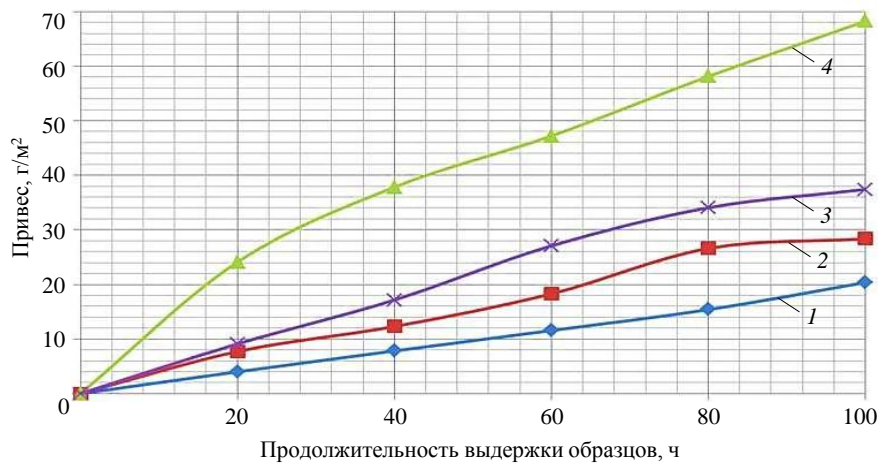


Рис. 4. Зависимость привеса образцов из слитков различных экспериментальных составов (1–4) от продолжительности выдержки образцов

На основании проведенных исследований жаростойкости образцов из слитков экспериментальных составов (табл. 1) выбран состав 1 сплава системы Fe–Cr–Al–Y, обеспечивающий наибольшую жаростойкость. Сплав этой системы превосходит по жаростойкости при температуре 1100 °С российские сплавы-аналоги ЭИ435 и ЭИ868 (табл. 2).

Таблица 2

| Зависимость показателя жаростойкости от состава сплава системы Fe–Cr–Al–Y | |
|---|-------------------------|
| Состав сплава | Жаростойкость, г/(м²·ч) |
| 1 | 0,204 |
| 2 | 0,341 |
| 3 | 0,869 |
| 4 | 0,427 |
| Сравнение с аналогами | |
| Сплав ЭИ435 | 0,315–0,466 |
| Сплав ЭИ868 | 0,365 |

Таким образом, для остальных исследований использовали слитки состава 1. Итоговые слитки получены по следующим схемам: вакуумно-индукционная выплавка с последующим вакуумно-дуговым переплавом (ВИ + ВДП) и вакуумно-индукционная выплавка с последующим вакуумно-индукционным переплавом с равноосной кристаллизацией (ВИ + ВИ-переплав).

На рис. 4 представлена диаграмма технологической пластичности (зависимость технологической пластичности сплава от температуры испытания) сплава системы Fe–Cr–Al–Y в зависимости от технологии переплава слитка.

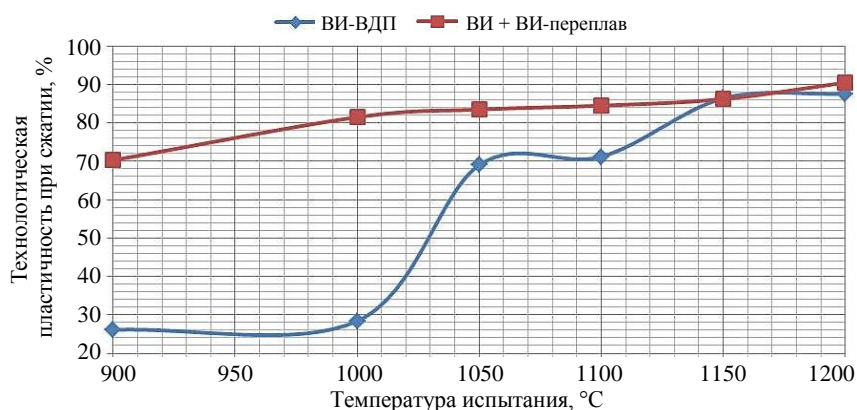


Рис. 4. Диаграмма технологической пластичности слитков из сплава системы Fe–Cr–Al–Y

Результаты исследования технологической пластичности сплава системы Fe–Cr–Al–Y показали, что слиток ВДП данного сплава имеет пониженную пластичность (технологическая пластичность при сжатии <50 %) в интервале температур 900–1000 °C, что связано в образованием продольных трещин (рис. 5) на поверхности образца по границам кристаллов в ВДП-слитках с направленной кристаллизацией. Слиток ВИ-переплава с равноосной кристаллизацией имеет высокую технологическую пластичность во всем рассматриваемом интервале температур.



Рис. 5. Продольные трещины на поверхности образцов из слитка вакуумно-дугового переплава сплава системы Fe–Cr–Al–Y после осадки

Несмотря на полученный результат, ВДП имеет в 2 раза бóльшую производительность по сравнению с ВИ-переплавом; из-за отсутствия прибыльной части слитка выход годных слитков превышает аналогичную характеристику для ВИ-переплава в 1,5–2 раза. Поэтому для дальнейшей работы выбраны слитки ВДП. Технологическая пластичность слитков ВДП позволяет получать из них деформированные полуфабрикаты методамиковки и прокатки.

Экспериментально отработаны режимыковки слитков ВДП сплава системы Fe–Cr–Al–Y. Методом свободнойковки на плоских бойках получены сутунки толщиной 30–40 мм, шириной ~150 мм (рис. 6, а). Из полученных сутунок изготовлены горячекатаные листы толщиной 3–4 мм (рис. 6, б) для дальнейшего получения ленты для сотовых уплотнений проточной части ГТД. Деформационную обработку полуфабрикатов проводили без появления дефектов, что подтверждает высокую технологичность сплава при горячей обработке давлением.



Рис. 6. Сутунки (а) и горячекатаные листы толщиной 3–4 мм (б) из жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al–Y

Заключения

Опытным путем отработаны режимы выплавки слитков экспериментальных составов сплава системы Fe–Cr–Al–Y. Получены слитки четырех составов, отличающихся содержанием хрома, алюминия и иттрия.

По результатам определения жаростойкости экспериментальных составов выбран состав, обеспечивающий максимальную жаростойкость при температуре 1100 °С в течение 100 ч. По показателям жаростойкости при 1100 °С сплав системы Fe–Cr–Al–Y превосходит сплавы-аналоги ЭИ435 и ЭИ868 в 1,5–2 раза.

Проведены исследования технологической пластичности сплава системы Fe–Cr–Al–Y в литом состоянии. Показано, что независимо от метода получения слитка сплав имеет удовлетворительную технологическую пластичность и может быть обработан методами свободнойковки и горячей прокатки.

Из слитков ВДП сплава системы Fe–Cr–Al–Y получены горячекатаные листы толщиной 3–4 мм, которые будут использованы для дальнейшего получения ленты для сотовых уплотнений проточной части ГТД.

Работа выполнена в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности» (Государственный контракт № 21411.1770290019.18.006 от 01.03.2021, шифр «Высота»).

Список источников

1. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Артеменко Н.И. Абразивно-износостойкие материалы для уплотнений проточной части ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
2. Салахова Р.К., Тихообразова А.Б., Фарафонов Д.П., Смирнова Т.Б. Особенности электролитического осаждения абразивно-износостойких покрытий на основе никеля // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
3. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Сараев А.А., Лещев Н.Е. Истираемость и эрозионная стойкость уплотнительных материалов проточной части ГТД // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
4. Бакрадзе М.М., Пескова А.В., Капланский Ю.Ю. Влияние термической пост-обработки на текстуру и анизотропию свойств конструкционного сплава системы Cu–Cr, полученного с помощью селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.08.2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-3-16.
5. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.

6. Оспенникова О.Г. Итоги реализации стратегических направлений по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей за 2012–2016 гг. // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
7. Иванов В.В., Тагильцев С.В. Сравнительный анализ технологий изготовления сотовых уплотнений // *Газотурбинные технологии*. 2019. № 6. С. 26–29.
8. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Алешина Р.Ш. Металлические волокна из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 1 (40). С. 44–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-44-52.
9. Абраимов Н.В. *Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин*. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
10. Nychka J.A., Clarke D.R. Quantification of Aluminum Outward Diffusion During Oxidation of FeCrAl Alloys // *Oxidation of Metals*. 2005. Vol. 63. No. 5/6. P. 324–352.
11. Clemendot F., Gras J.M., Van Duysen J.C. Influence of yttrium on high temperature behavior of Fe–Cr–Al–Y alloys // *Journal de Physique IV France*. 1993. No. 3. P. 291–299.
12. Mennicke C., Schumann E., Ruhle M. et al. The Effect of Yttrium on the Growth Process and Microstructure of α -Al₂O₃ on FeCrAl // *Oxidation of Metals*. 1998. Vol. 49. No. 5/6. P. 455–466.
13. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour // *Materials at high temperatures*. 2011. Vol. 28. Is. 4. P. 342–348.
14. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abra-deable seal materials in high temperature combustion Atmospheres // *Materials and Corrosion*. 2005. No. 11. P. 765–777.
15. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S. et al. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs // *Material Science Forum*. 2005. Vol. 492–493. P. 21–26.
16. Жуков Л.Л., Племянникова И.М., Миронова М.Н. и др. *Сплавы для нагревателей*. М.: *Металлургия*, 1985. 146 с.
17. Пономаренко Д.А., Летников М.Н., Скугорев А.В., Сидоров С.А. Использование специализированных изотермических прессов дляковки заготовок дисков турбины из труднодеформируемых жаропрочных сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. № 3. С. 19–25.
18. Капитаненко Д.В., Некрасов Б.Р., Изаков И.А., Чеботарева Е.С. Деформирующее оборудование для изотермической штамповки (часть 1) // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2021. № 10. С. 12–20.
19. Ахмедзянов М.В., Скугорев А.В., Овсепян С.В., Мазалов И.С. Разработка ресурсосберегающей технологии получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного свариваемого сплава ВЖ171 // *Производство проката*. 2015. № 1. С. 14–17.

References

1. Farafonov D.P., Leshchev N.E., Afanasiev-Khodykin A.N., Artemenko N.I. Abrasive wear-resistant seal materials of the gas turbine engine flow section. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-67-74.
2. Salakhova R.K., Tikhoobrazov A.B., Farafonov D.P., Smirnova T.B. Features of electrolytic deposition of abrasive-wear-resistant nickel-based coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-99-110.
3. Farafonov D.P., Migunov V.P., Sarayev A.A., Leshchev N.E. Abradability and erosion resistance of seals in turbine engine air-gas channel. *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-70-80.
4. Bakradze M.M., Peskova A.V., Kaplansky Yu.Yu. Influence of thermal post-treatment on the texture and anisotropy of mechanical properties in the Cu–Cr construction alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 16, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-3-16.
5. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Abstracts of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.

6. Ospennikova O.G. Implementation results of the strategic directions on creation of new generation of heat-resisting cast and wrought alloys and steels for 2012–2016. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-17-23.
7. Ivanov V.V., Tagiltsev S.V. Comparative analysis of manufacturing technologies for honeycomb seals. *Gasoturbinnye tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 26–29.
8. Farafonov D.P., Degovets M.L., Aleshina R.Sh. The metal fibers of heat-resistant alloys alloyed by platinum group metals. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 1 (40), pp. 44–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-44-52.
9. Abraimov N.V. *High-temperature materials and coatings for gas turbines*. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 336 p.
10. Nychka J.A., Clarke D.R. Quantification of Aluminum Outward Diffusion During Oxidation of FeCrAl Alloys. *Oxidation of Metals*, 2005, vol. 63, no. 5/6, pp. 324–352.
11. Clemendot F., Gras J.M., Van Duysen J.C. Influence of yttrium on high temperature behavior of Fe–Cr–Al–Y alloys. *Journal de Physique IV France*, 1993, no. 3, pp. 291–299.
12. Mennicke C., Schumann E., Ruhle M. et al. The Effect of Yttrium on the Growth Process and Microstructure of α -Al₂O₃ on FeCrAl. *Oxidation of Metals*, 1998, vol. 49, no. 5/6, pp. 455–466.
13. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour. *Materials at high temperatures*, 2011, vol. 28, is. 4, p. 342–348.
14. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abra-deable seal materials in high temperature combustion Atmospheres. *Materials and Corrosion*, 2005, no. 11, pp. 765–777.
15. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S. et al. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs. *Material Science Forum*, 2005, vol. 492–493, pp. 21–26.
16. Zhukov L.L., Plemyanikova I.M., Mironova M.N. et al. *Alloys for heaters*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 146 p.
17. Ponomarenko D.A., Letnikov M.N., Skugorev A.V., Sidorov S.A. The use of specialized isothermal presses for forging blanks of turbine disks from hard-to-deform heat-resistant alloys. *Kuznechno-shtampovoychnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2018, no. 3, pp. 19–25.
18. Kapitanenko D.V., Nekrasov B.R., Izakov I.A., Chebotareva E.S. Deforming equipment for isothermal stamping (part 1). *Kuznechno-shtampovoychnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2021, no. 10, pp. 12–20.
19. Akhmedzyanov M.V., Skugorev A.V., Ovsepyan S.V., Mazalov I.S. Development of a resource-saving technology for producing cold-rolled sheet from a high-temperature weldable alloy VZh171. *Proizvodstvo prokata*, 2015, no. 1, pp. 14–17.

Информация об авторах

Скугорев Александр Викторович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Мельникова Дарья Андреевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Столянков Юрий Владиславович, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ярошенко Александр Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Skugorev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Daria A. Melnikova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yury V. Stolyankov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander S. Yaroshenko, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.09.2022.

The article was submitted 25.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 06.09.2022.