

Научная статья

УДК:621.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-3-12

## СПЛАВ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Al–Y КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СОТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Скугорев<sup>1</sup>, Д.А. Мельникова<sup>1</sup>, Е.О. Тихомиров<sup>1</sup>, Ю.Д. Тришкин<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Разработана технология получения холоднокатаной ленты из жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al–Y, предназначенного для изготовления сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей с рабочей температурой до 1100 °С. Данный сплав может заменить жаропрочные сплавы марок ЭИ435 и ЭИ868, используемые в настоящее время для изготовления сотовых уплотнений. По показателям жаростойкости сплав системы Fe–Cr–Al–Y значительно превосходит жаропрочные никелевые сплавы марок ЭИ435 и ЭИ868.

**Ключевые слова:** жаростойкий сплав, фехраль, холоднокатаная лента, сотовые уплотнения, жаростойкость, истираемый уплотнительный материал

**Для цитирования:** Скугорев А.В., Мельникова Д.А., Тихомиров Е.О., Тришкин Ю.Д. Сплав системы Fe–Cr–Al–Y как перспективный материал для сотовых уплотнений проточной части газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-3-12.

Scientific article

## AN ALLOY OF THE Fe–Cr–Al–Y SYSTEM AS A PROMISING MATERIAL FOR HONEYCOMB SEALS IN THE FLOW PATH OF GAS TURBINE ENGINES

A.V. Skugorev<sup>1</sup>, D.A. Melnikova<sup>1</sup>, E.O. Tikhomirov<sup>1</sup>, Yu.D. Trishkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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 development of a technology for producing a cold-rolled sheet from a heat-resistant alloy of the Fe–Cr–Al–Y system. The alloy of the Fe–Cr–Al–Y 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, the alloy of the Fe–Cr–Al–Y system is significantly superior to nickel alloys ЭИ435 and ЭИ868.

**Keywords:** heat-resistant alloy, fechrал, cold-rolled sheet, honeycomb seals, heat resistance, abrasion-resistant sealing material

**For citation:** Skugorev A.V., Melnikova D.A., Tikhomirov E.O., Trishkin Yu.D. An alloy of the Fe–Cr–Al–Y system as a promising material for honeycomb seals in the flow path of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-3-12.

### Введение

В статье [1] показано, что сплав системы Fe–Cr–Al–Y превосходит никелевые сплавы марок ЭИ435 и ЭИ868 по жаростойкости при температуре 1100 °С, представлены исследования технологической пластичности и жаростойкости исследуемого сплава в литом состоянии. Дальнейшими этапами разработки технологии холоднокатаной ленты являются отработка холодной прокатки, а также режимов промежуточной и заключительной термической обработки ленты и листов. Исследованы механические свойства и жаростойкость образцов ленты номинальной толщиной 0,2 мм после смягчающей термической обработки. Полученные результаты сравнили с соответствующими характеристиками сплавов-аналогов (ЭИ435, ЭИ868) и требованиями технического задания на выполнение научно-исследовательской работы.

Работа выполнена 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») [2–4] и государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности».

### Материалы и методы

По отработанной технологии [1] получены два слитка из сплава системы Fe–Cr–Al–Y: плавки 1 и 2. Выплавку слитков проводили в вакуумной индукционной печи с последующим вакуумно-дуговым переплавом. Для изготовления опытных партий ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y дополнительно получены слитки плавки 3 и 4 со скорректированным химическим составом. Для плавки 3 и 4 выплавку проводили в вакуумной индукционной печи с формированием конических слитков с прибыльной частью. Химический состав слитков определяли методами атомно-эмиссионного и газового анализа (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав слитков из сплава системы Fe–Cr–Al–Y

Плавка	Метод выплавки	Содержание элементов, % (по массе)						
		Fe	Cr	Al + Ti + Y	Mn	Si	C	S
1	В вакуумной индукционной печи с вакуумно-дуговым переплавом	Основ- ва	23,2	5,773	0,29	0,75	<0,01	0,0017
2			23,8	5,805	0,28	0,67		0,0018
3	В вакуумной индукционной печи		20,3	5,897	0,09	0,28	0,0012	
4			21,2	6,114	0,096	0,29	0,015	0,0011

Химический состав плавки соответствует требованиям к сплаву системы Fe–Cr–Al–Y. Плавки незначительно различаются по содержанию основных легирующих элементов (Cr, Al, Ti, Y), плавка 4 содержит большее количество углерода [5, 6].

Ковку слитков на плоских бойках проводили на специализированном гидравлическом прессе с усилием 1600 тс, оснащенный индукционной установкой нагрева рабочего инструмента [7–9]. Полученные после ковки сутунки толщиной 40–50 мм подвергали горячей прокатке на стане «Дуо 900» до толщины 3,5–3,8 мм [10]. Окалину с поверхности горячекатаных листов снимали путем пескоструйной обработки.

Режимы холодной прокатки листов обрабатывали на лабораторном прокатном стане «Дуо 250». Прокатку листов и лент проводили в условиях Воскресенского экспериментального технологического центра по специальным материалам (ВЭТЦ) НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на реверсивном прокатном стане «Дуо-кварто 300» (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид реверсивного прокатного стана «Дуо-кварто 300» ВЭТЦ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Термическую обработку образцов, листов и ленты проводили в камерных печах электросопротивления, ленты в защитной атмосфере – в специализированной вакуумной печи с возможностью ускоренного охлаждения [11–13].

Механические свойства листов определяли по ГОСТ 1497–84, ленты – по ГОСТ 11701–84. Жаростойкость образцов ленты исследовали согласно методике, изложенной в работе [1]. Состояние поверхности образцов после испытаний на жаростойкость изучали методом оптической микроскопии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

Для отработки режимов холодной прокатки использовали слитки плавок 1 и 2, из которых изготовлены горячекатаные листы толщиной 3,5–3,8 мм. Технологииковки сутонок и горячей прокатки листов изложены в работе [1]. Из горячекатаных листов получены образцы для определения механических свойств, в частности относительного удлинения  $\delta_5$ , при комнатной температуре. Образцы испытывали до и после термической обработки при различных режимах (табл. 2).

Исследуемый сплав после горячей прокатки очень хрупкий, часть образцов разрушилась в процессе изготовления. После охлаждения в воде с температуры 1000–1100 °С на поверхности листовых заготовок появились термические трещины. Закалка с температуры 760–780 °С повышает пластичность сплава, однако ее величина недостаточна для успешной прокатки листов и ленты из данного материала.

Прокатка заготовок из сплава системы Fe–Cr–Al–Y после термической обработки при температурах 760–780 °С показала, что образец разрушается при суммарной степени деформации  $\varepsilon < 10$  %. Результаты пробной холодной прокатки образцов после закалки приведены на рис. 2.

**Технологическая пластичность сплава  
системы Fe–Cr–Al–Y при комнатной температуре**

Образец	Режим термической обработки	Относительное удлинение $\delta_5$ , %
1	Без термической обработки, после горячей прокатки	0
2		0
3		0
4	Закалка при температуре 760 °С, охлаждение в воде	4,0
5		4,0
6		5,0
7	Закалка при температуре 780 °С, охлаждение в воде	4,0
8		5,0
9		5,0
10	Закалка при температуре 1000 °С, охлаждение в воде	0
11		0
12		0
13	Закалка при температуре 1100 °С, охлаждение в воде	0
14		0
15		0
16	Закалка при температуре 1000 °С, охлаждение на воздухе	0
17		0
18		0
19	Закалка при температуре 1100 °С, охлаждение на воздухе	0
20		0
21		0



Рис. 2. Внешний вид образцов из сплава Fe–Cr–Al–Y после холодной прокатки: закалка при температуре 760 (а) и 780 °С (б), выдержка 30 мин, охлаждение в воде. Степень деформации  $\varepsilon$  составила 10 (а) и 7 % (б)

Трещина возникает на торцевой поверхности образца и распространяется вдоль направления прокатки. Характер излома – хрупкий, крупнокристаллический. Кристаллы на изломе ориентированы вдоль направления горячей прокатки.

Анализ научно-технических литературных данных [14, 15] показал, что прокатку сплавов типа фехралей и хромалей, в частности сплава системы Fe–Cr–Al–Y, с больших толщин проводят в режиме теплой деформации. Результаты механических испытаний при повышенных температурах образцов из сплава системы Fe–Cr–Al–Y после горячей прокатки без дополнительной термической обработки приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Технологическая пластичность сплава системы Fe–Cr–Al–Y  
после горячей прокатки без дополнительной термической обработки**

Образец	Температура испытания, °С	Относительное удлинение $\delta_5$ , %
1	200	13,5
2		16,0
3		14,5
4	300	42,5
5		40,0
6		45,0
7	400	33,5
8		35,0
9		30,0

Сплав системы Fe–Cr–Al–Y обладает максимальной технологической пластичностью при температуре испытания 300 °С, при температуре 400 °С пластичность сплава снижается, но остается достаточной для теплой прокатки листа.

Прокатка листов с подогревом позволила получить раскат толщиной 1,0–1,2 мм без трещин и разрывов (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид раската из сплава системы Fe–Cr–Al–Y после прокатки с предварительным подогревом

После предварительной теплой прокатки раскат из сплава системы Fe–Cr–Al–Y приобретает достаточную технологическую пластичность, позволяющую проводить последующую прокатку листов и ленты без подогрева заготовки.

В результате экспериментальной отработки технологии прокатки листов и ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y определена максимально возможная деформация листа до смягчающей термической обработки, а также подобран режим смягчающей термической обработки раската. По выбранному режиму изготовлены образцы ленты толщиной 0,2–0,3 мм. Предложенная технологическая схема позволяет изготавливать ленту толщиной от 0,1 до 0,3 мм.

Заключительная термическая обработка должна обеспечивать следующие механические свойства ленты в соответствии с техническими условиями: предел прочности  $\sigma_b \leq 800$  МПа, относительное удлинение  $\delta_{50} \geq 20$  %. Лента должна обладать низким сопротивлением деформации и высокой пластичностью для изготовления заготовок сотовых уплотнений методом холодной формовки [16].

Заготовки ленты, из которых изготавливали образцы для испытания на растяжение, термически обработаны при различных режимах закалки. Режимы различались температурой нагрева под закалку, выдержка составляла 30 мин. Заготовки образцов

охлаждали в воде. С увеличением порядкового номера режима температуру нагрева под закалку повышали. Расчетная длина рабочей части образцов для испытания на растяжение составила 50 мм. В табл. 4 приведены результаты механических испытаний образцов, полученных при различных режимах закалки.

Таблица 4

**Механические свойства ленты, полученной при различных режимах промежуточной термической обработки**

Режим термической обработки	Номинальная толщина ленты, мм	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_{50}$ , %
1	0,2	810–840	11,0–12,5
1	0,3	770–810	15,5–19,5
2		740–770	17,0–18,5
3		740–750	18,0–20,5
4	0,2–0,21	650–675	18,0–20,0
5	0,19–0,21	650–670	20,0–22,0
6	0,2–0,21	630–650	19,0–20,0
Требования по ТУ		Не более 800	Не менее 20

При увеличении температуры закалки прочность ленты уменьшается, а пластичность увеличивается. Однако при достижении определенной температуры закалки пластичность ленты начинает снижаться из-за чрезмерного роста зерна. Таким образом, оптимальные значения прочности и пластичности ленты достигнуты при термической обработке по режиму 5.

По отработанным технологическим режимам изготовлены партии ленты толщиной 0,2–0,25 мм из плавок 3 и 4 с отличающейся композицией легирующих элементов. Для промежуточной термической обработки раската и ленты выбран режим 5. Заключительную термическую обработку ленты проводили по двум различным технологическим цепочкам:

- в камерных электропечах с последующим ускоренным охлаждением в воде (режим 5) и щелочно-кислотным травлением для удаления окалины;
- в вакуумной электропечи при температуре и времени выдержки, соответствующих режиму 5, с последующим ускоренным охлаждением продувкой азота без травления.

В табл. 5 приведены результаты механических испытаний ленты после термической обработки в камерной и вакуумной печи.

Таблица 5

**Механические свойства ленты из сплава Fe–Cr–Al–Y, полученной при различных условиях заключительной термической обработки**

Условия термической обработки ленты	Номинальная толщина ленты, мм	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_{50}$ , %
В камерной печи, охлаждение в воде, травление	0,24–0,27	690–720	22,5–24,0
В вакуумной печи, охлаждение в потоке азота, без травления	0,24–0,27	655–716	20,0–22,0
Требования по ТУ		Не более 800	Не менее 20

Термическая обработка ленты из сплава Fe–Cr–Al–Y в вакуумной печи с возможностью ускоренного охлаждения садки позволяет получить требуемые механические свойства материала, при этом исключена необходимость последующего травления

поверхности. После вакуумной термообработки поверхность ленты гладкая, блестящая, после травления – матовая, шероховатая.

Для образцов ленты после термической обработки в камерной печи с травлением и в вакуумной печи определена жаростойкость при температуре 1100 °С в течение 100 ч. Жаростойкость исследованных образцов ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y в сравнении с аналогами, г/(м<sup>2</sup>·ч):

Лента из сплава системы Fe–Cr–Al–Y после термической обработки:	
в камерной печи, охлаждения в воде и травления	0,117
в вакуумной печи и охлаждения в потоке азота	0,049
без травления	
Никелевый сплав ЭИ435	0,315–0,466
Никелевый сплав ЭИ868	0,365

Для никелевых сплавов ЭИ435 и ЭИ868 указаны паспортные данные.

Результаты определения жаростойкости ленты показали, что удельный привес образцов после термической обработки в камерной печи и травления практически в 2 раза превышает удельный привес образцов после вакуумной термической обработки. На рис. 4 представлены изображения поверхности образцов ленты после испытаний на жаростойкость при 1100 °С в течение 100 ч.

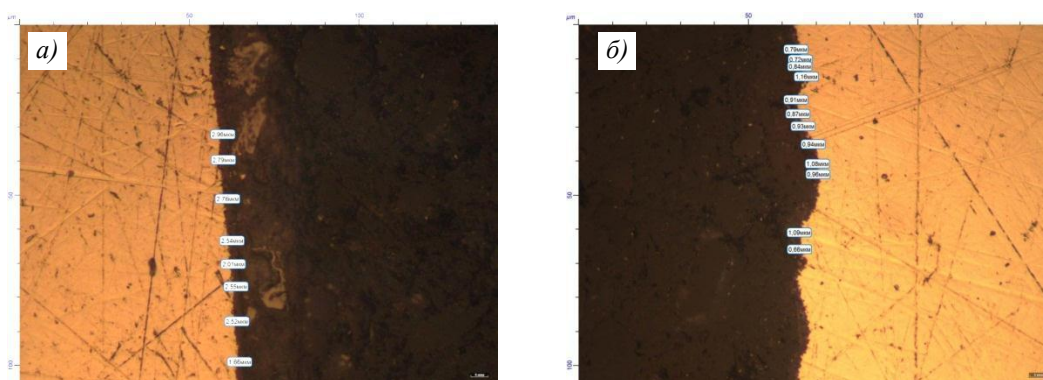


Рис. 4. Поверхность образцов ленты после вакуумной термической обработки (а) и термической обработки в камерной печи и травления (б), подвергнутых испытаниям на жаростойкость

Образцы после термической обработки в камерной печи и травления имеют более развитую поверхность. Толщина оксидного слоя после вакуумной термической обработки составляет 2–3 мкм, после термической обработки в камерной печи и травления: 0,7–1,2 мкм. Такое различие в толщине оксидного слоя можно объяснить пассивацией поверхности ленты при щелочно-кислотном травлении. Однако из-за того, что поверхность ленты после травления более развитая – имеет большую протяженность, общий показатель жаростойкости меньше, чем для ленты после вакуумной термической обработки.

При этом все исследуемые образцы по показателям жаростойкости значительно превосходят жаропрочные никелевые сплавы ЭИ435 и ЭИ698, используемые в отечественном двигателестроении для изготовления сотовых уплотнителей проточной части горячего тракта газотурбинных двигателей.

Для сравнения на рис. 5 представлен внешний вид образцов ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y и элемента сотового уплотнения газотурбинного двигателя из никелевого сплава марки ЭИ435, подвергнутых испытанию на жаростойкость при температуре 1100 °С в течение 100 ч.

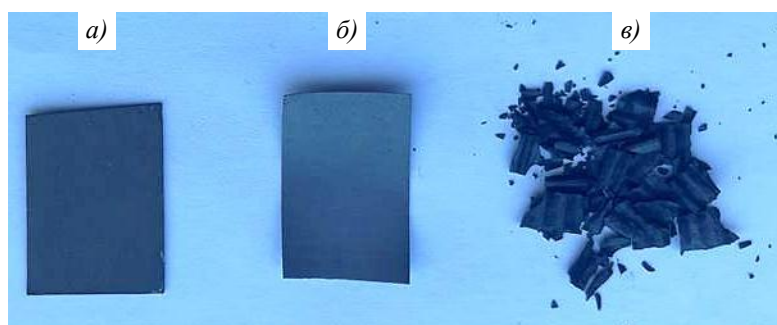


Рис. 5. Образцы после испытаний на жаростойкость: *а, б* – лента из сплава Fe–Cr–Al–Y соответственно без травления и после травления; *в* – элемент сотового уплотнения газотурбинного двигателя из никелевого сплава ЭИ435

### Заключения

Экспериментально отработана технология изготовления ленты из жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al–Y. Показано, что сплав после горячей прокатки имеет низкую технологическую пластичность при комнатной температуре. Начальную стадию прокатки для получения холоднокатаных листа и ленты необходимо проводить в режиме теплой деформации. Последующая прокатка возможна без предварительного подогрева раската.

Выбраны режимы промежуточной и заключительной термической обработки ленты, обеспечивающие получение требуемого комплекса механических свойств, в частности показателей пластичности. Полученные данные подтверждают высокий уровень технологичности ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y для изготовления сотовых уплотнений проточной части горячего тракта газотурбинных двигателей.

Отработаны режимы вакуумной термической обработки ленты из сплава системы Fe–Cr–Al–Y, позволяющие значительно улучшить качество поверхности. По сравнению с лентой после термической обработки в камерной электропечи с последующим щелочно-кислотным травлением лента после вакуумной термической обработки имеет меньшую шероховатость и более блестящую поверхность, что в свою очередь влияет на показатели жаростойкости данного материала.

Толщина оксидного слоя на поверхности образца после термической обработки в камерной электропечи с последующей щелочно-кислотной обработкой составляет 0,7–1,2 мкм, после термической обработки в вакуумной печи без травления: 2–3 мкм. Но из-за более развитой поверхности удельный привес после испытаний образца ленты, подвергнутого травлению, в 2 раза больше по сравнению с образцом после вакуумной термической обработки без травления.

Лента из сплава системы Fe–Cr–Al–Y по показателям жаростойкости значительно превосходит аналогичную заготовку из жаропрочных никелевых сплавов марок ЭИ435 и ЭИ698.

### Список источников

1. 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> (дата обращения: 29.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-3-12.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. 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.

4. 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.
5. Фарафонов Д.П., Лещев Н.Е., Афанасьев-Ходькин 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.
6. 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.
7. 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.
8. Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
9. Денисова В.С., Малинина Г.А., Власова О.В., Виноградова А.Ю. Влияние добавок тетраборида кремния на свойства жаростойких покрытий для защиты жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.
10. Елисеев Э.А., Леонов А.В., Вознесенская Н.М., Нефедкин Д.Ю. Исследование изменения структуры под действием влияния различных технологических факторов на свойства холоднокатаной ленты из никель-бериллиевого сплава марки 97НЛ-ВИ // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2022. № 1. С. 29–34.
11. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Куксенова В.И., Герасимов С.А., Алексеева М.С., Громов В.И. Влияние вакуумной химико-термической обработки на износостойкость сталей ВКС-7 и ВКС-10 // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
13. Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С., Семенов М.Ю., Громов В.И., Курпякова Н.А., Севальнев Г.С. Применение комплексной химико-термической обработки для упрочнения высокопрочной дисперсионно-твердеющей теплостойкой стали, микролегированной РЗМ // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 7 (757). С. 38–42.
14. Абраимов Н.В. *Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин*. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
15. Жуков Л.Л., Племянникова И.М., Миронова М.Н. и др. *Сплавы для нагревателей*. М.: Металлургия, 1985. 146 с.
16. Иванов В.В., Тагильцев С.В. Сравнительный анализ технологий изготовления сотовых уплотнений // *Газотурбинные технологии*. 2019. № 6. С. 26–29.

#### References

1. 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> (accessed: August 29, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-3-12.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. Kapitanenko D.V., Nekrasov B.R., Izakov I.A., Chebotareva E.S. Deforming equipment for isothermal stamping (part 1). *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2021, no. 10, pp. 12–20.
8. Bakradze M.M., Skugorev A.V., Kucheryayev V.V., Bubnov M.V. Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
9. Denisova V.S., Malinina G.A., Vlasova O.V., Vinogradova A.Yu. The influence of silicon tetra-boride additives on properties of heat-resistant coatings for nickel alloys protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.
10. Eliseev E.A., Leonov A.V., Voznesenskaya N.M., Nefedkin D.Yu. Study of changes in structure under the influence of various technological factors on the properties of cold-rolled strip made of nickel-beryllium alloy grade 97NL-VI. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2022, no. 1, pp. 29–34.
11. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Kuksenova L.I., Gerasimov S.A., Alekseeva M.S., Gromov V.I. Influence of vacuum chemical and thermal processing on wear resistance of VKS-7 and VKS-10 steels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-3-8.
13. Smirnov A.E., Faurtdinov R.S., Semenov M.Yu., Gromov V.I., Kurpyakova N.A., Sevalnev G.S. Application of complex chemical-thermal treatment for strengthening high-strength dispersion-hardening heat-resistant steel microalloyed with rare-earth metals. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, no. 7 (757), pp. 38–42.
14. Abraimov N.V. *High temperature materials and coatings for gas turbines*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993, 336 p.
15. Zhukov L.L., Plemyanikova I.M., Mironova M.N. et al. *Alloys for heaters*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 146 p.
16. Ivanov V.V., Tagiltsev S.V. Comparative analysis of technologies for manufacturing honeycomb seals. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 26–29.

**Информация об авторах**

**Скугорев Александр Викторович**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

**Тихомиров Евгений Олегович**, начальник цеха, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Тришкин Юрий Дмитриевич**, мастер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

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

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

**Evgeny O. Tikhomirov**, Foreman, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Yuriy D. Trishkin**, Master, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.09.2023.  
The article was submitted 15.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 19.09.2023.