

Научная статья

УДК 66.067.124

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22

**ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ*. Часть 2***Г.И. Дейнега¹, И.Г. Кузьмина¹, О.Н. Битюцкая¹, А.Р. Нарский¹*

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

Аннотация. Во второй части исследования, проведенного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, рассматривается технология изготовления пенокерамических фильтров, предназначенных для очистки расплава от неметаллических включений. Проведено опробование образцов фильтров на основе оксидов алюминия (III) и циркония (IV) при переплаве и разливе жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ с использованием вакуумной индукционной печи. Оценена загрязненность и изучен химический состав сплавов после фильтрации, проведены испытания физико-механических свойств. Установлено полное соответствие свойств изготовленных фильтров требованиям отраслевого стандарта.

Ключевые слова: пенокерамические фильтры, литейное производство, жаропрочные сплавы, керамическая суспензия, огнеупоры, механические свойства, оксид циркония (IV)

Для цитирования: Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.

Scientific article

**FOAM CERAMIC FILTERS BASED
ON DOMESTIC REFRACTORY MATERIALS. Part 2***G.I. Deynega¹, I.G. Kuzmina¹, O.N. Bityutskaya¹, A.R. Narsky¹*

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 research conducted at the Kurchatov Institute Research Center – VIAM is devoted to the technology of manufacturing foam ceramic filters for cleaning the melt from non-metallic inclusions. In this part of the work, samples of filters based on aluminum oxide (III) and zirconium oxide (IV) were tested during remelting and casting of superalloys ZhS6U-VI and VX4L-VI on a vacuum induction furnace. The contamination was assessed and the chemical composition of the alloys after filtration was studied, and tests for mechanical properties were carried out. The full compliance of the properties with the requirements of the industry standard has been determined.

Keywords: foam ceramic filters, foundry production, superalloys, ceramic suspension, refractories, mechanical properties, zirconium (IV) oxide

For citation: Deynega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narsky A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 2. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 11 (129), 2023.

Введение

Широко применяемые в ряде областей техники современные газотурбинные двигатели обладают повышенным ресурсом работы и надежностью. Для изготовления ответственных деталей турбин применяют никелевые жаропрочные сплавы, обладающие целым комплексом уникальных свойств, которые позволяют обеспечить высокие требования по уровню технических и эксплуатационных характеристик. Разработка составов жаропрочных сплавов и технологии их производства входит в число приоритетных задач, стоящих перед НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [1–4].

Для получения качественных литых деталей требуется, в частности, минимизация уровня таких вредных примесей, как неметаллические включения, образующиеся при взаимодействии растворенных в металле кислорода и азота с составляющими расплава [5, 6]. Для рафинирования применяют различные типы фильтров, наиболее эффективными среди которых являются пенокерамические фильтры. Их структура позволяет задерживать мелкие включения, уменьшать турбулентность потока жаропрочного сплава, способствуя ее снижению и улучшению качества металла [7].

Пенокерамические фильтры изготавливают нанесением на полимерную модель (матрицу из ретикулированного полиуретана) нескольких слоев керамической суспензии с последующей сушкой и выжиганием полимера в процессе обжига в электрических печах по определенным технологическим режимам. Обычно фильтры устанавливают в литейные желоба или металлоприемники (рис. 1).

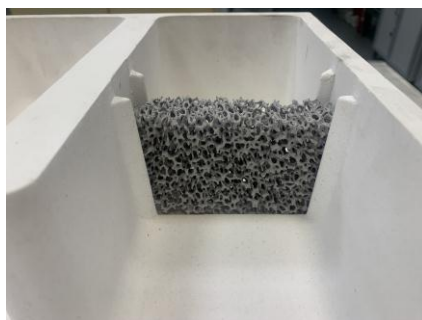


Рис. 1. Металлоприемник с установленным пенокерамическим фильтром

Эффективность применения пенокерамических фильтров оценивают по степени загрязненности сплавов неметаллическими включениями, а также по уровню свойств сплавов после фильтрования [8, 9].

Как в Российской Федерации, так и за рубежом широко проводятся научные исследования в области технологии фильтрационного рафинирования при литье жаропрочных сплавов, в том числе при применении пенокерамических фильтров [10–18].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведено исследование, посвященное технологии изготовления пенокерамических фильтров на основе огнеупорных оксидов с использованием отечественных материалов [19]. Результаты работы нацелены на решение проблемы импортозамещения, так как прежде для данной цели в серийном производстве применяли исключительно импортные фильтры из Германии и Великобритании.

В первой части данной научно-исследовательской работы изготовлено несколько экспериментальных образцов пенокерамических фильтров типа ПФ-1, ПФ-2 и ПФ-3. Оценен уровень их физико-механических свойств (разрушающее усилие на сжатие при приложении двустороннего давления по одной оси) в соответствии с ГОСТ 4071.2–2021 и общей пористости с помощью кажущейся плотности и геометрических

параметров образцов в соответствии с ГОСТ 24468–2020. Предварительно проведены следующие эксперименты:

- анализ параметров технологического процесса изготовления керамических суспензий на основе микропорошков оксида алюминия (III) Al_2O_3 и оксида циркония (IV) ZrO_2 и связующих на водной основе;
- подбор гранулометрического состава, приводящего к минимальной усадке готового изделия;
- проработка технологии нанесения суспензии на полиуретановую модель. Выяснено, что все образцы пенокерамических фильтров полностью соответствуют требованиям поставленного технического задания [20].

Материалы и методы

Требования к материалам, применяемым для изготовления пенокерамических фильтров, приведены в первой части данной работы; там же перечислены методы исследования их свойств [20]. Необходимо добавить, что также проведены следующие исследования: методами атомно-эмиссионного, масс-спектрометрического и газового анализов оценена загрязненность сплавов неметаллическими включениями и проанализирован химический состав сплавов.

Оценку неметаллических включений проводили на шлифах на оптическом микроскопе при просмотре всей площади нетравленного шлифа при увеличении $\times 200$. Чистоту материала шлифов оценивали по следующим видам неметаллических включений: плены, шлаковые глобулы, нитридные кластеры.

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

Результаты и обсуждение

Выплавка жаропрочных сплавов, анализ их загрязненности неметаллическими включениями и изучение химического состава до фильтрации

На следующем этапе исследования в вакуумной индукционной печи проведена выплавка жаропрочных сплавов марок ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ, предназначенных для последующей фильтрации от неметаллических включений и оценки комплекса свойств. Запланированы также следующие исследования: оценка загрязненности сплавов неметаллическими включениями, проведение анализа химического состава сплавов, включая определение содержания кислорода, азота и циркония до фильтрации.

Выплавку сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ производили из 100 % переплава отходов литейного производства моторостроительных предприятий. Режим выплавки определен технологической инструкцией «Производство литых прутковых заготовок из жаропрочных сплавов марок ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ЖСЗДК-ВИ, ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ВХ4Л-ВИ, ВЖЛ12Э-ВИ в вакуумных индукционных печах с применением 100 % литейных отходов».

Проведено разовое исследование сплавов марок ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ на неметаллические включения до фильтрации.

Классификацию по чистоте проводили путем подсчета количества неметаллических включений на площади 315 мм^2 с учетом рейтингового коэффициента (K) для каждого вида включений. Итоговый балл чистоты K_{Σ} определяли суммированием коэффициентов. Результаты оценки неметаллических включений представлены в табл. 1.

Неметаллические включения, обнаруженные в исследованных образцах, представлены на рис. 2.

Таблица 1

**Оценка загрязненности образцов жаропрочных никелевых сплавов
неметаллическими включениями до фильтрации**

Сплав	Условный номер образца	Рейтинговый балл чистоты для			Итоговый балл чистоты K_{Σ}	Средний итоговый балл чистоты
		плен	шлаковых глобулей	нитридных кластеров		
ЖС6У-ВИ	1	2,25	6,00	Не обнаружены	8,25	7,5
	2	2,25	4,50		6,75	
ВХ4Л-ВИ	3	0,25	18,50		18,75	16,87
	4	0,75	14,25		15,00	

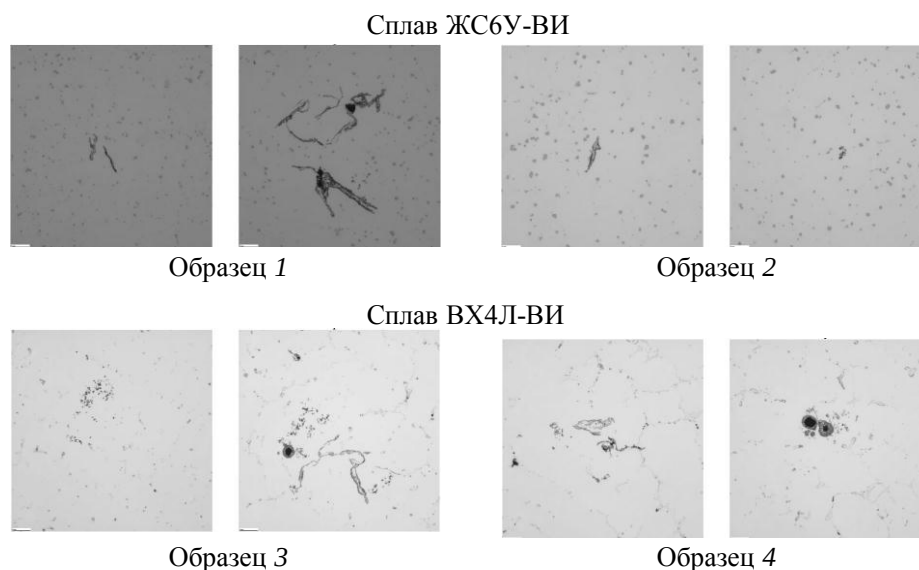


Рис. 2. Неметаллические включения ($\times 200$) в образцах без травления из жаропрочных никелевых сплавов до фильтрации

Для изучения химического состава жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ на предмет химического взаимодействия пенокерамических фильтров с образованием новых фаз проведены атомно-эмиссионный, масс-спектрометрический и газовый анализы сплавов до фильтрации.

Поскольку выплавку жаропрочных никелевых сплавов проводили исключительно из литейных отходов, то результаты анализа показали наличие большого количества неметаллических включений.

Результаты исследования химического состава показали соответствие полученных жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ требованиям ОСТ1 90126–85 (с Изменениями 1–11).

*Опробование образцов пенокерамических фильтров при переплаве
и разливке жаропрочных сплавов в вакуумной индукционной печи*

Опробование пенокерамических фильтров на основе отечественных оксидных материалов проводили в вакуумной индукционной печи по определенному режиму в соответствии с технологической инструкцией.

По результатам опробования образцов изготовленных фильтров проведен анализ на неметаллические включения. В табл. 2 представлены результаты оценки неметаллических включений.

Таблица 2

Оценка загрязненности образцов жаропрочных никелевых сплавов неметаллическими включениями после фильтрации

Сплав	Условная маркировка образца	Рейтинговый балл чистоты для			Итоговый балл чистоты K_{Σ}	Средний итоговый балл чистоты
		плен	шлаковых глобул	нитридных кластеров		
ЖС6У-ВИ	A	Не обнаружены	4,25	Не обнаружены	4,25	4,87
	K		4,50		4,50	
	S		5,75		6,00	
	Zr		4,50		4,75	
ВХ4Л-ВИ	A	Не обнаружены	7,25		7,25	4,31
	K		4,00		4,00	
	S		4,00		4,00	
	Zr		2,00		2,00	

Неметаллические включения, обнаруженные в исследованных образцах, представлены на рис. 3.

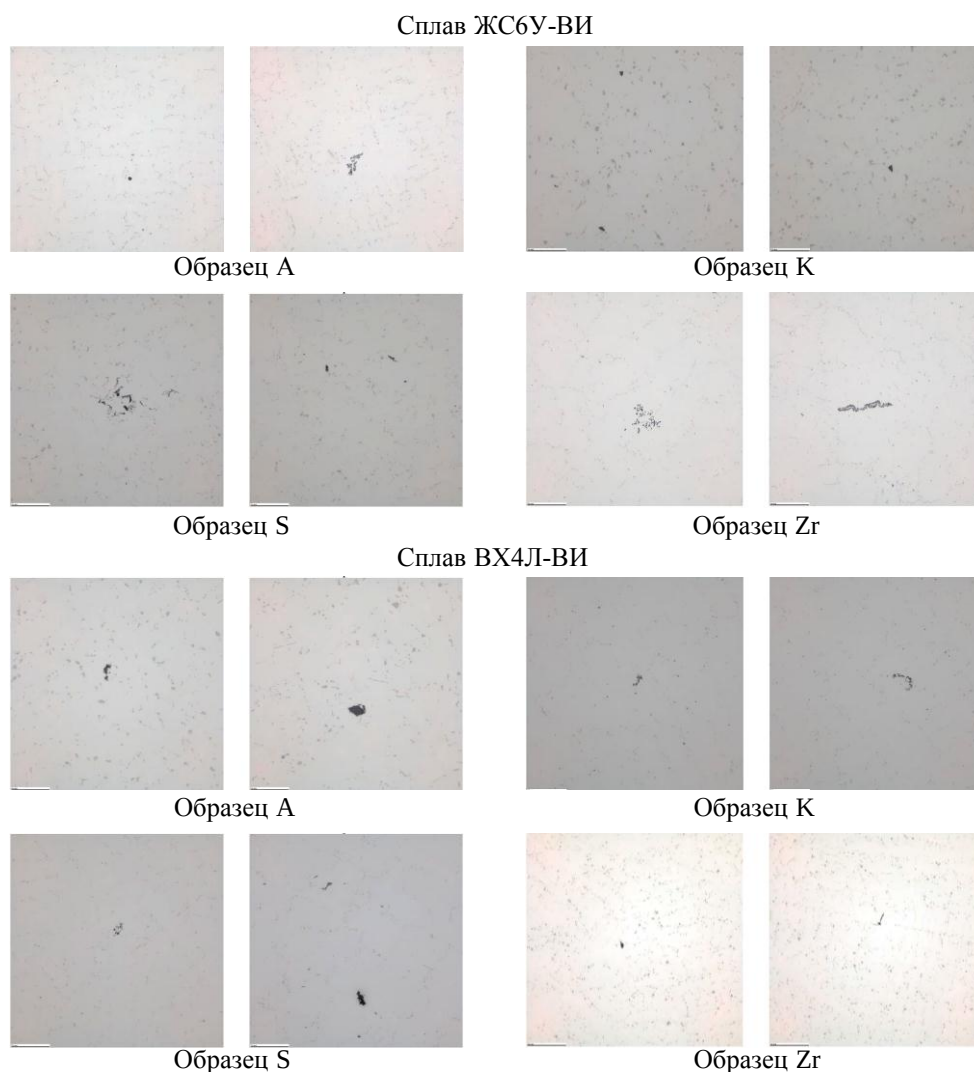


Рис. 3. Неметаллические включения ($\times 200$) в образцах без травления из жаропрочных никелевых сплавов после фильтрации

Использование пенокерамических фильтров производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при разливке сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ обеспечило чистоту сплава не хуже, чем с применением серийно применяемого импортного пенокерамического фильтра.

Для изучения сравнительной оценки химического состава сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ на предмет химического взаимодействия пенокерамических фильтров с образованием новых фаз определен химический состав сплавов после проведения фильтрации. Образования новых фаз не выявлено, химический состав сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ соответствовал требованиям ОСТ1 90126–85.

Образцы из жаропрочных никелевых сплавов испытаны на растяжение (удлинение δ_5) и ударную вязкость (только для сплава ВХ4Л-ВИ). Результаты испытаний представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты испытаний на растяжение образцов жаропрочных никелевых сплавов при температуре 20 °С после фильтрации

Сплав	Условная маркировка образца	σ_b , Н/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %
ЖС6У-ВИ	A	1040	7,0
	K	1020	6,4
	S	1050	8,2
	Zr	1070	8,4
ОСТ1 90126–85 (с Изменениями 1–11)		≥ 830	≥ 3
ВХ4Л-ВИ	A	910	13
	K	1030	17
	S	940	19
	Zr	980	18,5
ОСТ1 90126–85 (с Изменениями 1–11)		≥ 780	≥ 4

Таблица 4

Результаты испытаний на ударную вязкость жаропрочного никелевого сплава ВХ4Л-ВИ

Условная маркировка образца	Ширина образца, мм	Высота рабочего сечения, мм	Площадь поперечного сечения, см ²	Энергия разрушения, Дж	KCU, Дж/см ²
A	10,01	8,05	0,81	27,1	34
K	10,01	8,00	0,80	27,8	35
S	10,00	8,00	0,80	16,5	21
Zr	10,01	8,05	0,81	24,6	31
ОСТ1 90126–85 (с Изменениями 1–11)					20

При испытании образцов сплавов на длительную прочность (τ_p) все образцы сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ сняты до разрушения, простояв 45 ч при температуре 975 °С и нагрузке 226 Н/мм² и температуре 800 °С и нагрузке 206 Н/мм².

Установлено соответствие механических показателей сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ требованиям отраслевого стандарта.

Проведенные работы позволили составить технологическую инструкцию «Изготовление пенокерамических фильтров», которая включает требования к применяемым исходным материалам, оптимальному гранулометрическому составу и технологическим параметрам изготовления пенокерамических фильтров типа ПФ-1, ПФ-2 и ПФ-3.

*Изготовление и проведение испытаний партии
пенокерамических фильтров из микропорошков оксидов
 Al_2O_3 и ZrO_2 и связующих на водной основе*

В соответствии с разработанной технологической инструкцией изготовлена партия пенокерамических фильтров. Образцы фильтров испытали на прочность и пористость: прочность на сжатие составила от 2,19 до 4,06 МПа, что превосходит требование технического задания более чем в 3 раза; пористость составляет от 81 до 88 %, что также соответствует требованиям технического задания (не менее 75 %).

В вакуумной печи провели плавку сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ с применением при их разливке пенокерамических фильтров из отечественных оксидных материалов на основе Al_2O_3 и ZrO_2 производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также иностранных фильтров на основе ZrO_2 , используемых в серийном производстве литой прутковой заготовки. Затем проведены сравнительная оценка загрязненности сплавов неметаллическими включениями и анализ химического состава сплавов до и после фильтрации, а также выполнены механические испытания.

Заключения

Подтверждено, что использование пенокерамических фильтров производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при разливке жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ позволяет снизить количество неметаллических включений в расплаве до уровня импортного серийно применяемого пенокерамического фильтра зарубежного производства.

Для повторной сравнительной оценки составов сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ на предмет химического взаимодействия пенокерамических фильтров с образованием новых фаз после фильтрации проведено определение химического состава сплавов методами атомно-эмиссионного, масс-спектрометрического и газового анализов.

Подтверждено отсутствие взаимодействия фильтров со сплавами с образованием новых фаз; химический состав сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ соответствовал требованиям отраслевого стандарта.

По результатам повторных физико-механических испытаний образцов сплавов после фильтрации с применением пенокерамических фильтров установлено соответствие требованиям отраслевого стандарта «Сплавы жаропрочные литейные вакуумной выплавки».

При опробовании все пенокерамические фильтры выдержали термический удар без разрушения и сохранили пропускную способность, поэтому они рекомендованы к применению при изготовлении литой прутковой заготовки:

- фильтр типа ПФ-1 на основе Al_2O_3 – для сплавов на основе никеля;
- фильтры типа ПФ-2 и ПФ-3 на основе композиционного материала и ZrO_2 – для хромоникелевых сплавов и сплавов на основе никеля.

Разработана технология изготовления пенокерамических фильтров на основе оксидов Al_2O_3 и ZrO_2 с использованием отечественных материалов. Выпущены также технические условия «Фильтры пенокерамические», содержащие структурные свойства, методики проведения испытаний и правила приемки пенокерамических фильтров типа ПФ-1, ПФ-2 и ПФ-3.

Таким образом, фильтрация через разработанные пенокерамические фильтры из отечественных материалов существенно снижает содержание неметаллических включений в готовом металле, что обеспечивает улучшенное качество литых деталей из жаропрочных сплавов.

Разработка в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ технологии изготовления пенокерамических фильтров на основе огнеупорных оксидов позволит провести импортозамещение серийно применяемых фильтров при изготовлении литой прутковой заготовки из жаропрочных сплавов. Кроме того, основными потенциальными потребителями разработанной технологии являются предприятия АО «ОДК».

Список источников

1. Каблов Е.Н., Шомполов Е.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каюмов Р.Г. Организация производства литых прутковых (шихтовых) заготовок из никелевых литейных жаропрочных сплавов // *Электromеталлургия*. 2007. № 1. С. 2–5.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № SP2. С. 68–78.
3. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
4. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. Коровин В.А., Леушин И.О., Беляев С.В., Демченко А.И., Хацько М.С., Панов А.Г. Влияние фильтрационного рафинирования на микроструктуру и механические свойства сплава ВЖ-159 // *Технология металлов*. 2023. № 9. С. 2–7.
6. Демченко А.И., Рябцев А.И., Коровин В.А., Беляев С.В., Леушин И.О. Влияние фильтрации на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЭП-648-ВИ // *Технология металлов*. 2019. № 9. С. 2–5.
7. Демченко А.И., Коровин В.А., Леушин И.О., Беляев С.В. Влияние фильтрации расплава на структуру сплава ЭП-718 // *Металлургия машиностроения*. 2019. № 5. С. 12–15.
8. Стариков Д.Г., Вьюшков В.Н., Карсанова Л.Г., Бер Л.Б. Фильтрация расплавов при производстве жаропрочных никелевых сплавов методом вакуумной индукционной плавки // *Технология легких сплавов*. 2020. № 1. С. 70–78.
9. Коровин В.А., Леушин И.О., Демченко А.И., Калмыков А.А. Оценка эффективности фильтрации жаропрочного металла через пенокерамический фильтр на примере сплава Inconel-718, выплавленного в условиях ПАО «РУСПОЛИМЕТ» // *Литейщик России*. 2021. № 4. С. 7–11.
10. Бабашов В.Г., Варрик Н.М., Карасева Т.А. Пористая керамика для фильтрации расплавов металлов и горячих газов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
11. Сидоров В.В., Исходжанова И.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнолегированного никелевого расплава // *Электromеталлургия*. 2011. № 11. С. 17–21.
12. Демченко А.И., Шевяков В.Ф., Коровин В.А., Беляев С.В., Гущин В.Н. Повышение качества никелевого сплава фильтрацией через пенокерамический фильтр // *Литейщик России*. 2019. № 6. С. 29–33.
13. Староверов Ю.С., Чернов Ю.А. Применение пенокерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производстве за рубежом // *Огнеупоры*. 1992. № 1. С. 38–40.
14. Офицеров А.А., Заволоснов Б.С. Пенокерамические фильтры для фильтрации жаропрочных никелевых сплавов // *Литейное производство*. 1993. № 4. С. 19–20.
15. Тэн Э.Б., Воеводина М.А. Фильтрование расплава высокопрочного чугуна // *Литейное производство*. 1993. № 7. С. 5–8.

16. Дибров И.А., Козлов А.В. Разработки в области плавки, заливки, модифицирования и рафинирования литейных сплавов // Литейное производство. 2000. № 6. С. 24–26.
17. Дубровин В.К. Повышение качества отливок из жаропрочных сплавов путем фильтрационной очистки // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия. 2008. № 24. С. 55–59.
18. Демченко А.И., Шевяков В.Ф., Коровин В.А., Беляев С.В., Гушин В.Н., Леушин И.О. Рафинирование никелевых сплавов с применением пенокерамических фильтров // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18. № 6. С. 243–246.
19. Ечин А.Б., Дейнега Г.И., Нарский А.Р. Новые разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.

References

1. Kablov E.N., Shompolov E.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kayumov R.G. Organization of production of cast rod (charge) billets from nickel casting heat-resistant alloys. *Elektrometallurgiya*, 2007, no. 1, pp. 2–5.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Features of the technology of smelting and casting modern foundry high-heat-resistant nickel alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mechanical engineering*, 2011, no. SP2, pp. 68–78.
3. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G. The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
4. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. Korovin V.A., Leushin I.O., Belyaev S.V., Demchenko A.I., Khatsko M.S., Panov A.G. The influence of filtration refining on the microstructure and mechanical properties of the VZh-159 alloy. *Tekhnologiya metallov*, 2023, no. 9, pp. 2–7.
6. Demchenko A.I., Ryabtsev A.I., Korovin V.A., Belyaev S.V., Leushin I.O. The influence of filtration on the structure and properties of the heat-resistant nickel alloy EP-648-VI. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 9, pp. 2–5.
7. Demchenko A.I., Korovin V.A., Leushin I.O., Belyaev S.V. The influence of melt filtration on the structure of the EP-718 alloy. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2019, no. 5, pp. 12–15.
8. Starikov D.G., Vyushkov V.N., Karsanova L.G., Ber L.B. Filtration of melts in the production of heat-resistant nickel alloys using vacuum induction melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2020, no. 1, pp. 70–78.
9. Korovin V.A., Leushin I.O., Demchenko A.I., Kalmykov A.A. Evaluation of the efficiency of filtration of heat-resistant metal through a ceramic foam filter using the example of the Inconel-718 alloy, smelted under the conditions of PJSC RUSPOLYMET. *Liteyshchik Rossii*, 2021, no. 4, pp. 7–11.
10. Babashov V.G., Varrik N.M., Karaseva T.A. Porous ceramic for filtration of metal melts and hot gases (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 6. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 19, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
11. Sidorov V.V., Iskhodzhanova I.V., Rigin V.E., Folomeikin Yu.I. Evaluation of filtration efficiency when casting complex-alloyed nickel melt. *Electrometallurgiya*, 2011, no. 11, pp. 17–21.
12. Demchenko A.I., Shevyakov V.F., Korovin V.A., Belyaev S.V., Gushchin V.N. Improving the quality of nickel alloy by filtration through a ceramic foam filter. *Liteyshchik Rossii*, 2019, no. 6, pp. 29–33.

13. Staroverov Yu.S., Chernov Yu.A. The use of ceramic foam filters in foundries and steelmaking abroad. *Ogneupory*, 1992, no. 1, pp. 38–40.
14. Ofitserov A.A., Zavolosnov B.S. Foam ceramic filters for filtration of heat-resistant nickel alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 4, pp. 19–20.
15. Ten E.B., Voevodina M.A. Filtration of high-strength cast iron melt. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 7, pp. 5–8.
16. Dibrov I.A., Kozlov A.V. Developments in the field of melting, pouring, modifying and refining foundry alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, 2000, no. 6, pp. 24–26.
17. Dubrovin V.K. Improving the quality of castings from heat-resistant alloys by filtration cleaning. *Vestnik YUUrGU. Ser. Metallurgy*, 2008, no. 24, pp. 55–59.
18. Demchenko A.I., Shevyakov V.F., Korovin V.A., Belyaev S.V., Gushchin V.N., Leushin I.O. Refining of nickel alloys using ceramic foam filters. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2020, vol. 18, no. 6, pp. 243–246.
19. Echin A.B., Deynega G.I., Narsky A.R. New developments of NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in the field of materials for casting processes of superalloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 19, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Deynega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narsky A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 19, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.

Информация об авторах

Дейнега Григорий Иванович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кузьмина Ирина Григорьевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Битюцкая Ольга Николаевна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нарский Андрей Ростиславович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Grigory I. Deynega, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina G. Kuzmina, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga N. Bityutskaya, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey R. Narsky, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.01.2024.
The article was submitted 29.12.2023; approved and accepted for publication after reviewing 11.01.2024.