

Научная статья

УДК 66.067.124

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25

**ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ. Часть 1**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. В первой части исследования, проведенного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, рассматривается технология изготовления пенокерамических фильтров, предназначенных для очистки расплава от неметаллических включений. Разработаны технологические параметры изготовления пенокерамических фильтров с использованием отечественных огнеупорных материалов, изготовлено несколько экспериментальных образцов фильтров на основе оксидов алюминия (III) и циркония (IV), определены их физико-механические свойства. Установлено полное соответствие свойств изготовленных фильтров требованиям технического задания.

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 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.

Scientific article

**FOAM CERAMIC FILTERS
BASED ON DOMESTIC REFRACTORY MATERIALS. Part 1**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. In the first part of the study conducted at the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, the technology of manufacturing foam ceramic filters designed to purify the melt from non-metallic inclusions is considered. Technological parameters for the manufacture of foam ceramic filters using domestic refractory materials have been developed, several experimental samples of filters based on aluminum oxide (III) and zirconium oxide (IV) have been manufactured, their physical and mechanical properties have been determined. The full compliance of the properties of the manufactured filters with the requirements of the technical specification has been established.

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 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25.

Введение

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведена научная работа, посвященная исследованиям пенокерамических фильтров на основе огнеупорных оксидов с использованием отечественных материалов и разработке технологии их изготовления [1]. Особая актуальность работы обусловлена тем, что в настоящее время возникла необходимость импортозамещения материалов, используемых при производстве деталей горячего тракта газотурбинных двигателей.

Развитие авиационной техники и энергетического машиностроения неразрывно связано с созданием новых перспективных газотурбинных двигателей, имеющих повышенный ресурс работы и надежность [2–4]. Для изготовления литых деталей турбин, несущих наибольшие тепловые и силовые нагрузки в двигателе, применяют современные жаропрочные сплавы на никелевой основе, обладающие комплексом уникальных эксплуатационных свойств: значительными прочностными характеристиками, оптимальной ползучестью, стойкостью к окислению при повышенных температурах [5–7].

Важным условием для совершенствования механических и технических свойств никелевых жаропрочных литейных сплавов является обеспечение заданного химического состава, ультранизких содержаний примесей углерода, серы, кислорода, азота, цветных металлов, а также неметаллических включений, таких как оксиды, нитриды, фосфаты и сульфиды. Одним из самых результативных способов уменьшения количества неметаллических включений служит технология рафинирования или очистки металлического расплава при разливке через пенокерамические фильтры, получившая широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. При этом осаждение суспензированных в жидком металле неметаллических включений происходит на фильтрующей поверхности пенокерамического фильтра [8]. Наиболее широко применяемые размеры пор в расчете на один дюйм: 10, 20 и 30 ppi.

Пенокерамические фильтры отличаются развитой поверхностью, которая позволяет эффективно задерживать неметаллические включения, при условии смачивания расплавленным металлом поверхности фильтра [6].

По внешнему виду пенокерамические фильтры представляют собой губку – это пористые тела с внутренней фильтрующей поверхностью. Их получают методом пропитки органической пены – вспененного полимера (например, полиуретана) – с последующим обжигом при высокой температуре. При этом происходит выгорание полимерной основы – матрицы, а керамическая – спекается и образует каркас. На эффективность задерживания неметаллических включений решающее влияние оказывают высокая пористость фильтра и толщина фильтрующего слоя. Применение пенокерамических фильтров повышает чистоту литых деталей и уменьшает количество брака при их производстве, а также увеличивает выход годного металла и способствует уменьшению расхода электроэнергии [9].

На рис. 1 представлен пример пенокерамического фильтра, установленного в металлоприемник, в который будет производиться разливка сплава.

Существует множество разнообразных видов пенокерамических фильтров, применяемых при литье различных сплавов и сталей, в зависимости от их химической активности и температур разливки металла. Они широко применяются в сталеплавильном и чугунолитейном производстве, при литье жаропрочных и алюминиевых сплавов. Фильтры условно можно разделить на сетчатые и объемные – более широко распространенные в настоящее время, получаемые на основе тугоплавких материалов.

К сетчатым относятся фильтры типа сеток, выполненных из стеклотканей, т. е. стекловолокна с различными покрытиями. Фильтры данного типа при очистке сплавов позволяют отделять частицы с размерами, превышающими размер диаметра отверстия сетки. Однако сетчатые фильтры не препятствуют прохождению более мелких частиц с фильтруемым потоком вещества. Сетчатые фильтры обладают небольшим ресурсом

при фильтрации расплава металлов ввиду быстрой деградации стеклянных волокон при высокой температуре. В отличие от двумерных, объемные пенокерамические фильтры могут задерживать включения микронных размеров.



Рис. 1. Пенокерамический фильтр, установленный в металлоприемник

Поскольку при изготовлении литых деталей горячего тракта газотурбинных двигателей чаще всего используется технология точного литья методом направленной кристаллизации с монокристаллической структурой, то следует учитывать, что при некачественной фильтрации оксиды, нитриды, карбиды и сульфиды будут выделяться внутри монокристалла и превращаться в источник равноосных зерен, что приведет к снижению физико-механических характеристик жаропрочных сплавов.

Применение пенокерамических фильтров позволяет получать литые детали из жаропрочных никелевых сплавов с более высокой надежностью. В частности, в исследовании [8] доказана целесообразность применения пенокерамических фильтров для очистки расплавов жаропрочных никелевых сплавов от неметаллических включений, что позволяет повысить механические свойства сплава ЭП648-ВИ и снизить количество кислорода в 2 раза, а азота – на 43 %.

В России давно проводятся исследовательские работы в области изготовления и применения пенокерамических фильтров [1, 6, 8–13]. Кроме того, керамические фильтры активно производят за рубежом: этим занимаются швейцарская компания Swiss Aluminium Ltd, американская компания Selee и немецкая компания Drache, а также китайская компания SQ Group [11].

С учетом введения санкций на поставку импортных материалов в Россию и выдвинутой инициативы Президента Российской Федерации по неотложному развитию импортозамещения, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ возникла острая необходимость в разработке технологии изготовления отечественных пенокерамических фильтров для рафинирования сплавов и сталей. Решение данной проблемы потребовало комплексного подхода к разработке технологии и материалов, отвечающих современным требованиям, для повышения качества сплавов, снижения количества дефектов и улучшения основных свойств конечных изделий.

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

Материалы и методы

Материалы, применяемые для изготовления пенокерамических фильтров, должны обладать высокими показателями прочностных характеристик, огнеупорностью и температуростойкостью, а также химической стойкостью к расплавам металлов.

Для изготовления фильтров необходимы материалы, имеющие достаточные значения химической стойкости и прочности при высоких температурах в условиях агрессивных сред. Для очистки жаропрочных никелевых сплавов фильтры должны выдерживать жесткие тепловые, механические и химические воздействия.

Данным требованиям соответствуют такие материалы, как оксиды алюминия (III) Al_2O_3 и циркония (IV) ZrO_2 .

Оксид алюминия Al_2O_3 представляет собой белый тугоплавкий порошок с температурой плавления $2044\text{ }^\circ\text{C}$, температурой кипения $3530\text{ }^\circ\text{C}$, плотностью от $3,98$ до $4,01\text{ г/см}^3$ и твердостью, близкой к твердости алмаза. Наиболее термостабильной кристаллической модификацией оксида алюминия является корунд – перспективный и часто используемый материал для технической керамики благодаря его высокой температуростойкости, химической инертности и высоким показателям прочностных свойств. Комплекс свойств, которыми обладает корунд: твердость (9 по шкале Мооса); высокая прочность, которая в зависимости от способа формования и добавок может находиться в диапазоне $300\text{--}750\text{ МПа}$; трещиностойкость – позволяет применять его в различных отраслях промышленности.

Керамические материалы на основе оксида циркония (IV) ZrO_2 обладают рядом специфических свойств: высокой химической стойкостью, низкой теплопроводностью, уникальными электрофизическими параметрами, высокими трибологическими характеристиками. Температура плавления ZrO_2 близка к $2730\text{ }^\circ\text{C}$, твердость составляет 8,5 по шкале Мооса, а плотность находится в пределах от $5,8$ до $6,0\text{ г/см}^3$. Оксид циркония (IV) имеет высокие показатели прочности и трещиностойкости благодаря присущему полиморфизму структуры. На границе образующейся трещины происходит мартенситное превращение структуры ZrO_2 с увеличением объема и последующим залечиванием трещины. Материалы на основе оксида циркония (IV) широко применяются в промышленности для изготовления ответственных деталей и узлов, предназначенных для работы в экстремальных условиях.

В данной работе определены следующие основные свойства пенокерамических фильтров: прочность на сжатие при комнатной температуре, кажущаяся плотность и общая пористость, содержание углерода и серы, кислорода и азота, химический состав, усилие на растяжение при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$, ресурс длительной прочности, ударная вязкость, а также оценена загрязненность неметаллическими включениями.

С учетом имеющегося опыта НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также различных предприятий отрасли, при изготовлении керамической суспензии применяли хорошо зарекомендовавшее себя кремнезольное связующее на водной основе Армосил АМ [14, 15]. Это универсальное связующее используется для изготовления керамических оболочковых форм с повышенными прочностными характеристиками. При низком содержании натрия в его составе температурные свойства керамических оболочковых форм увеличиваются, что позволяет использовать их в производстве отливок из жаропрочных сплавов на основе никеля. Содержание коллоидного оксида циркония (IV), вступающего в реакцию при высокотемпературной обработке с оксидом алюминия (III), обеспечивает спекание материала и достижение требуемых прочностных свойств при более низких температурах.

На основе исходных материалов разработаны три типа пенокерамических фильтров ПФ-1, ПФ-2 и ПФ-3, фотографии которых представлены на рис. 2. Керамическую суспензию готовили на основе наполнителя, состоящего из огнеупорных оксидов Al_2O_3 и ZrO_2 . В табл. 1 приведены составы керамической суспензии для каждого типа фильтра, соотношение связующего и наполнителя, а также вязкость керамической суспензии.

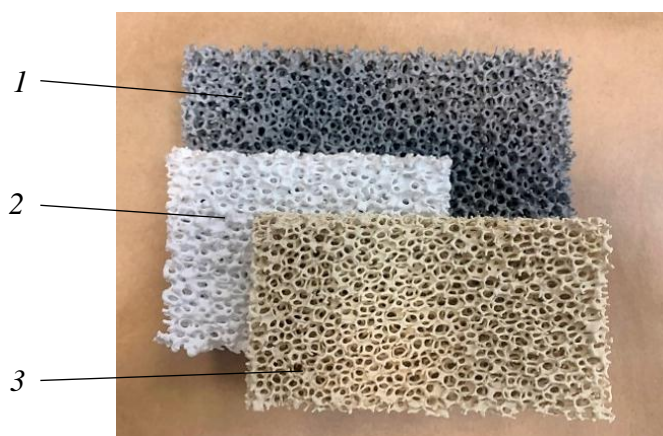


Рис. 2. Изготовленные образцы пенокерамических фильтров ПФ-1 (1), ПФ-2 (2) и ПФ-3 (3)

Таблица 1

**Составы керамических суспензий на водной основе
для изготовления пенокерамических фильтров**

Тип фильтра	Наполнитель из оксида циркония (IV), % (по массе)	Наполнитель из электроплавленного корунда марки 25А, % (по массе)	Количество твердой фазы на 1 л жидкой фазы, кг	Вязкость суспензии по ВЗ-246, с
ПФ-1	–	Порошок с зернистостью от 2 до 45 мкм	1,5–2,5	20–30
ПФ-2	Порошок с зернистостью от 0 до 55 мкм		1,5–2,5	20–30
ПФ-3	Порошок с зернистостью от 0 до 63 мкм	–	1,5–2,5	20–30

При приготовлении керамической суспензии на основе электрокорунда для изготовления пенокерамического фильтра типа ПФ-1 добавляли алюминиевый порошок марки АСД-4 в суспензию для обеспечения набора прочности структуры во время высокотемпературной обработки.

При приготовлении суспензии для изготовления фильтра типа ПФ-2 в нее добавляли порошок оксида магния MgO. Подобная добавка образует твердые растворы на границах зерен Al₂O₃ и ZrO₂ и способствует более полному спеканию изделия, что в свою очередь способствует повышению механических характеристик пенокерамических фильтров.

Приготовление суспензии проводили в мешалке с заданной частотой вращения (об/мин) таким образом, чтобы наполнитель полностью находился во взвеси. Контроль вязкости производили на вискозиметре ВЗ-246 на пробе объемом 100 мл.

Результаты и обсуждение

*Исследование технологических параметров нанесения
приготовленной суспензии на полимерную модель*

с заданным размером ячейки и изготовление пенокерамических фильтров

Слой керамической суспензии наносили на матрицу из ретикулированного полиуретана путем однократного окунания следующим образом:

– матрицу из ретикулированного полиуретана медленно погружали в керамическую суспензию и, не извлекая из суспензии, поворачивали вокруг горизонтальной оси на 180 градусов;

– по прошествии определенного времени (несколько секунд) с момента погружения матрицу извлекали из керамической суспензии и медленно поворачивали вокруг своей оси под наклоном для равномерного распределения и удаления излишков керамической суспензии с ее поверхности.

Сушку слоя керамического покрытия проводили в воздушной среде в течение от 1 до 2 ч. Для интенсификации процесса сушки слоя керамического покрытия применяли вентилятор.

Таким способом на матрицу из ретикулированного полиуретана наносили четыре слоя керамического покрытия. После сушки образцы пенокерамических фильтров обжигали в высокотемпературных электрических печах по разработанным технологическим режимам: при температуре до 1750 °С (в зависимости от состава фильтра) и определенной скорости нагрева печи до максимальной температуры (°С/ч) с выдержкой образцов всех типов фильтров при максимальной температуре в печи; охлаждение образцов проводили с печью.

Определение физико-механических свойств образцов пенокерамических фильтров

Образцы пенокерамических фильтров всех типов испытывали на прочность методом одноосного двустороннего сжатия в соответствии с ГОСТ 4071.2–2021. Температура испытания составляла 20 °С. Все образцы показали значения прочности при изгибе, превышающие требования технического задания в несколько раз (результаты представлены в табл. 2).

Таблица 2

Прочность образцов пенокерамических фильтров

Тип фильтра	Среднее значение прочности при изгибе, МПа	Требования технического задания, МПа
ПФ-1	3,28	>1
ПФ-2	4,06	>1
ПФ-3	2,19	>1

Затем определяли пористость образцов из всех типов фильтров по ГОСТ 24468–2020. В соответствии с техническим заданием общая пористость должна составлять >75 %. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пористость образцов пенокерамических фильтров

Тип фильтра	Средние размеры образцов, мм			Масса, г	Кажущаяся плотность, г/см ³	Общая пористость, %
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>			
ПФ-1	99,90	100,00	24,93	115,82	0,46	88,4
ПФ-2	99,98	100,01	24,85	206,23	0,83	81,0
ПФ-3	99,85	100,25	24,96	217,37	0,87	85,5

На основании полученных результатов выяснено, что свойства изготовленных образцов пенокерамических фильтров всех типов соответствуют требованиям технического задания как по прочности при изгибе, так и по пористости.

Заключения

В первой части исследования определены методы изготовления образцов из пенокерамических фильтров с использованием отечественных огнеупорных оксидных материалов, осуществлен подбор исходных материалов и спекающих добавок. Проведена разработка технологических параметров приготовления суспензий из микропорошков оксидов алюминия (III) Al_2O_3 и циркония (IV) ZrO_2 и связующих на водной основе типа Армосил АМ. Подобран гранулометрический состав, обеспечивающий наименьшую усадку изделия. Отработаны технологические параметры нанесения приготовленной керамической суспензии на полиуретановую модель с заданным размером ячейки.

Изготовлены экспериментальные образцы пенокерамических фильтров (ПФ-1, ПФ-2, ПФ-3) на основе оксидов Al_2O_3 и ZrO_2 , определены их физико-механические свойства: разрушающее усилие на сжатие при приложении двустороннего давления по одной оси, общая пористость изделий с помощью кажущейся плотности и геометрических параметров образцов.

По результатам испытаний установлено, что все типы изготовленных пенокерамических фильтров соответствовали требованиям технического задания.

Во второй части исследовательской работы, которой будет посвящена отдельная статья, проведена выплавка жаропрочных никелевых сплавов марок ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ, предназначенных для опробования в вакуумных индукционных печах процессов фильтрации от неметаллических включений с применением пенокерамических фильтров.

Проведенные затем оценка загрязненности сплавов неметаллическими включениями, анализ химического состава сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ, испытания на механические свойства и длительную прочность сплавов позволят сделать окончательный вывод о соответствии разработанных пенокерамических фильтров требованиям ОСТ1 90126-85.

Список источников

1. 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: 11.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
2. 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.
3. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
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: 11.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. 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.
6. Сидоров В.В., Исходжанова И.В., Ригин В.Е., Фоломейкин Ю.И. Оценка эффективности фильтрации при разливке сложнелегированного никелевого расплава // Электromеталлургия. 2011. № 11. С. 17–21.

7. 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.
8. 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.
9. Староверов Ю.С., Чернов Ю.А. Применение пенокерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производстве за рубежом // *Огнеупоры*. 1992. № 1. С. 38–40.
10. Офицеров А.А., Заволоснов Б.С. Пенокерамические фильтры для фильтрации жаропрочных никелевых сплавов // *Литейное производство*. 1993. № 4. С. 19–20.
11. 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: 24.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
12. Тэн Э.Б., Воеводина М.А. Фильтрование расплава высокопрочного чугуна // *Литейное производство*. 1993. № 7. С. 5–8.
13. Дибров И.А., Козлов А.В. Разработки в области плавки, заливки, модифицирования и рафинирования литейных сплавов // *Литейное производство*. 2000. № 6. С. 24–26.
14. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Мутилов В.Н., Соколов А.В., Суханова В.П. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликату в ЛВМ // *Литейное производство*. 2012. № 3. С. 30–31.
15. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Получение мелкозернистой структуры отливок из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

References

1. 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: September 11, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
2. 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.
3. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
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: September 11, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
5. 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.
6. Sidorov V.V., Iskhodzhanova I.V., Rigin V.E., Folomeikin Yu.I. Evaluation of filtration efficiency during casting of complex-alloyed nickel melt. *Elektrometallurgiya*, 2011, no. 11, pp. 17–21.
7. 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.
8. 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.

9. Staroverov Yu.S., Chernov Yu.A. Application of ceramic foam filters in foundries and steelmaking abroad. *Ogneupory*, 1992, no. 1, pp. 38–40.
10. Ofitserov A.A., Zavolosnov B.S. Foam ceramic filters for filtration of heat-resistant nickel alloys. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 4, pp. 19–20.
11. 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: August 24, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-54-63.
12. Ten E.B., Voevodina M.A. Filtration of high-strength cast iron melt. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 7, pp. 5–8.
13. 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.
14. Emelyanov V.O., Martynov K.V., Mutilov V.N., Sokolov A.V., Sukhanova V.P. Aqueous solution of silica sol as an alternative to ethyl silicate in LVM. *Liteynoe proizvodstvo*, 2012, no. 3, pp. 30–31.
15. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 24, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

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 13.10.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.10.2023.
The article was submitted 13.10.2023; approved and accepted for publication after reviewing 16.10.2023.