

Научная статья

УДК 66.017:666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-49-56

## О КРИТЕРИЯХ ПРИГОДНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСНАСТКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ АЛЮМИНИЯ

Н.М. Варрик<sup>1</sup>, В.Г. Максимов<sup>1</sup>, А.В. Юдин<sup>1</sup>, В.Г. Бабашов<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.** *Керамическая оснастка находит все более широкое применение в металлургической отрасли, в частности в цехах разлива цветных металлов. В настоящее время для тиглей и форм для литья разработаны различные виды термостойкой керамики. За рубежом для изготовления оснастки чаще всего используют керамику из природного минерала волластонита, содержащую также пластификаторы и флюсующие добавки. Для получения подобных изделий в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана керамика на основе высококремнеземного волокна. Рассмотрены некоторые аспекты долговечности и критерии оценки эксплуатационных свойств керамических изделий для изготовления оснастки непрерывной разливки алюминия.*

**Ключевые слова:** *керамическая оснастка, разливка алюминия, кремнеземное волокно, коррозионная стойкость*

**Для цитирования:** Варрик Н.М., Максимов В.Г., Юдин А.В., Бабашов В.Г. О критериях пригодности керамических изделий для изготовления оснастки непрерывной разливки алюминия // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-49-56.

Scientific article

## ON THE CRITERIA OF SUITABILITY OF CERAMIC PRODUCTS FOR THE MANUFACTURE OF EQUIPMENT FOR CONTINUOUS CASTING OF ALUMINUM

N.M. Varrik<sup>1</sup>, V.G. Maksimov<sup>1</sup>, A.V. Yudin<sup>1</sup>, V.G. Babashov<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.** *Ceramic tooling is increasingly being used in the metallurgical industry, particularly in casting workshops of non-ferrous metals. Currently, various types of heat-resistant ceramics have been developed for injection molds and crucibles. Abroad, ceramics made from the natural mineral wollastonite, which also contains plasticizers and fluxing additives, are most often used for the manufacture of tooling. To obtain such products NRC «Kurchatov Institute» – VIAM has developed ceramics based on high silica fiber. In this paper, some aspects of the durability and criteria for evaluating their operational properties of ceramic products for the manufacture of tooling for continuous casting of aluminum are considered.*

**Keywords:** *ceramic tooling, aluminum casting, silica fiber, corrosion resistance*

**For citation:** Varrik N.M., Maksimov V.G., Yudin A.V., Babashov V.G. On the criteria of suitability of ceramic products for the manufacture of equipment for continuous casting of aluminum. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-49-56.

### Введение

Материалы из керамики находят все более широкое применение во многих отраслях народного хозяйства благодаря таким свойствам, как долговечность, стойкость к воздействию окружающей среды, доступность сырья, низкая энергоемкость технологий изготовления. Активно используется техническая, конструкционная и функциональная керамика. В частности, огнеупорная керамика востребована в качестве оснастки и футеровки в горячих цехах металлургической промышленности. В последние десятилетия устойчивый рост экономики страны привел к повышенному спросу на продукцию из алюминиевых сплавов, поэтому большое внимание уделяется разработке керамических изделий, функционирующих в контакте с алюминиевыми расплавами, таких как ванные, тигли, щелевые сопла стаканов-кристаллизаторов [1–4].

Используемая ранее для изготовления литейной оснастки асбестовая термосиликатная керамика на основе известково-кремнеземного связующего и антофиллит-асбестового наполнителя не соответствует современным требованиям по термической и химической стойкости к алюминиевому расплаву. Кроме того, различие значений температурного коэффициента линейного расширения наполнителя и связующего вызывает напряжения в изделии и приводит к деструкции материала. В настоящее время для тиглей и форм для литья разработаны различные виды термостойкой керамики [5–9].

За рубежом при изготовлении литейной оснастки для цветных металлов широко используют керамику на основе волластонита. Природный минерал волластонит является низкоосновным гидросиликатом кальция, имеет игольчатый габитус кристаллов и образует частицы удлиненной формы при любой степени помола, что способствует образованию более прочной структуры готового материала. Благодаря метасиликатному составу и цепочечной структуре волластонит в сочетании с известково-кремнеземными связующими имеет высокую термическую и химическую стойкость и не смачивается алюминиевым расплавом.

Для изготовления керамики используют волластонит, обладающий совершенной спайностью по призме, желателен с минимальным содержанием снижающих спайность и огнеупорность примесей. Изделия из волластонитовой керамики формируют методом прессования. Для пластифицирования формируемой массы вводят глинистые и флюсующие добавки, которые не влияют на свойства готовых изделий.

Следует отметить, что технология получения волластонитовой керамики имеет особенности, так как ее спекание происходит в узком температурном интервале, а быстрое увеличение содержания жидкой фазы может приводить к деформации изделий. Добавки глины, карбоната бария и оксида алюминия способствуют расширению температурного интервала спекания. Температура спекания волластонита достаточно высока и в зависимости от состава исходной смеси и условий проведения технологического цикла может находиться в диапазоне 1000–1300 °С. Керамика из чистых разновидностей природного волластонита имеет низкую усадку, что позволяет получить изделия сложной формы и точных размеров. Данная керамика имеет высокую термостойкость, поэтому востребована в цехах разливки цветных металлов.

За последние десятилетия в России разработаны и запущены в производство несколько разновидностей керамики на основе волластонита. Можно отметить разработки Томского политехнического университета и ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина [6–8]. В ОНПП «Технология» разработан способ получения керамики на основе порошков природного волластонита различных марок и налажен выпуск ряда изделий для металлургической промышленности. В частности, из порошков волластонита с высоким содержанием длинноигльчатых частиц методом полусухого прессования получена керамика плотностью  $\sim 1 \text{ г/см}^3$  для огнеупорных узлов литейных

столов и ряд других изделий для литейного производства. Содержание волластонита в керамике составляет не менее 70 % (по массе), химическое взаимодействие с расплавом при литье алюминия при температурах до 850 °С отсутствует.

Следует отметить, что в качестве оснастки литейных цехов востребована оксидная керамика, отличающаяся стойкостью к окислению. Из-за предрасположенности к окислению на воздухе при высоких температурах бескислородная керамика, иногда превосходящая по некоторым свойствам оксидную, имеет ограниченные области применения. В литейном производстве помимо окисления в кислородсодержащих средах происходит коррозионное воздействие расплава металла. При плавке металла в тиглях из оксидной керамики возможно восстановление огнеупорного материала тигля. Изучение коррозионной стойкости керамики в конкретных условиях эксплуатации имеет большое практическое значение [10–12].

Ввиду высокой коррозионной стойкости сложно оценить степень коррозионного повреждения оксидной керамики по изменению массы образцов, глубине проникновения коррозии или количеству очагов коррозии на единицу площади поверхности, как это делается для металлических материалов. В Уральском государственном горном университете исследована кинетика восстановления кремния из диоксида расплавленным алюминием [12]. Установлено, что при прохождении расплава алюминия через кварцевую трубку керамика взаимодействует с алюминием. В результате образуется алюмоматричный композиционный материал с микро- и наночастицами кремния, массовая доля которых зависит от продолжительности высокотемпературного контакта компонентов. Влияние коррозии на работоспособность керамики можно оценить по изменению механических характеристик в процессе работы и по долговечности при эксплуатации.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разрабатывают керамические материалы на основе кварцевых и кремнеземных волокон для использования в химических средах при повышенных температурах. В частности, изготавливают керамические изделия для расходных деталей литейных установок непрерывной разливки алюминиевых сплавов из композиционной волокнистой керамики на основе кварцевого или кремнеземного волокна и связующего [13–15].

В данной работе рассмотрены некоторые свойства подобной керамики для изготовления деталей литейной оснастки для производства алюминия, содержащей высококремнеземные волокна и связующее на основе бора. Цель работы – изучение влияния механических и физических свойств на пригодность керамического материала для разливки алюминиевых сплавов.

### Материалы и методы

Микроструктуру образцов керамики из кварцевого волокна исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа, прочность при изгибе – по ГОСТ 17177–94, плотность – по стандартному для высокопористых материалов методу обмера, теплопроводность – на лабораторной установке одностороннего нагрева на дисковых образцах, долговечность – по числу теплосмен при колебаниях температуры от 20 до 1100 °С.

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

### Результаты и обсуждение

Образцы керамического материала получали путем двухстадийного измельчения высококремнеземного волокна в воде с добавлением порошка бора и небольшого количества поливинилового спирта с последующим вакуумным фильтрованием волокнистой

пульпы через бумажный фильтр. После высушивания и обжига сырой заготовки получали керамические образцы с равноплотной изоморфной структурой. Из спеченного блока механическим путем вырезали образцы для определения физико-механических свойств, а также опытные образцы технологической оснастки для разливки алюминиевого сплава – щелевые сопла стаканов-кристаллизаторов, которые испытывали в условиях серийного производства. Средняя плотность образцов полученного материала составила  $0,3 \text{ г/см}^3$ .

Микроструктуры керамического материала представлены на рис. 1.

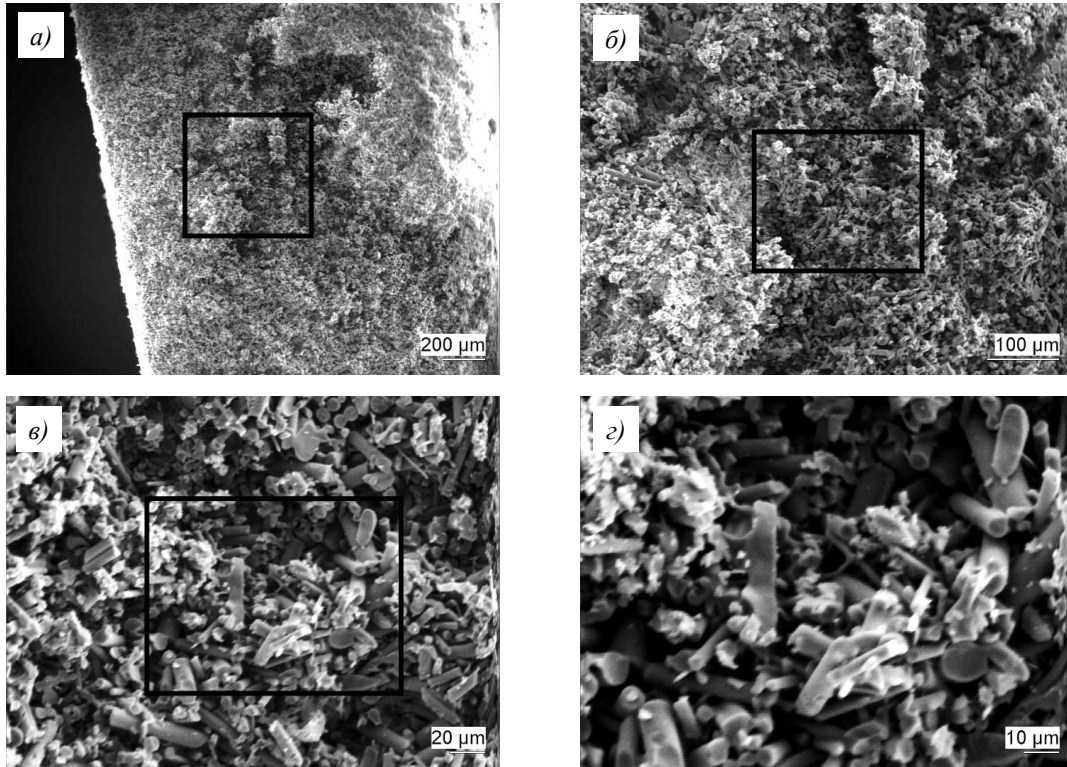


Рис. 1. Микроструктуры керамического материала, содержащего высококремнеземные волокна и связующее на основе бора, при различном увеличении (сканирующая электронная микроскопия)

Образец оснастки для непрерывной разливки алюминия с щелевым соплом из полученного керамического материала представлен на рис. 2.



Рис. 2. Керамический образец с щелевым соплом

Основные свойства полученного материала и наиболее распространенного в данной сфере волластонитового огнеупорного материала согласно данным [5, 8, 9] приведены в таблице. Стойкость к коррозии в расплаве алюминия и другие эксплуатационно-технологические свойства оценивали при работе материала в составе промышленной машины непрерывной разливки алюминиевой ленты из расплава в производственных условиях.

## Свойства волластонитовой и высококремнеземной керамики

Керамика	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при изгибе, МПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Допустимая степень деформации, %	Термоудар до 100 циклов, °С
Волластонитовая	1000–1800	5–20	0,15–0,6	Менее 0,1	20–850
Высококремнеземная	300–500	40–100	Менее 0,1	0,5–1,0	20–1100

*Физические свойства*

Сравнение полученных данных позволяет сделать вывод, что новый материал обладает большей прочностью по сравнению с аналогом, а также значительным преимуществом по допустимому относительному удлинению до разрушения и, как следствие, большей эксплуатационной гибкостью. Это объясняется особенностями микроструктуры материала (рис. 1, з), состоящего из точно связанных между собой волокон, что обеспечивает значительное снижение модуля упругости при сохранении прочности. Кроме того, вытянутые высококремнеземные волокна аморфной структуры обладают большим отношением длина/диаметр, чем «выколотые по спайности» кристаллические волластонитовые. Разработанный материал имеет существенное преимущество по теплопроводности.

*Коррозионная стойкость*

Полученный керамический материал является стойким к воздействию алюминиевого расплава. Потери функциональности непосредственно от коррозии материалов для деталей оснастки не наблюдали. Более того, после длительного воздействия алюминиевого расплава на поверхности материала на основе высококремнеземного волокна зафиксировано меньшее количество следов коррозии по сравнению с волластонитовой керамикой. Данный результат является неочевидным, так как ряд силикатных материалов, в том числе большинство стандартных стекол, при подобных условиях реагируют с алюминием интенсивно. Оксид кремния в расплаве алюминия термодинамически неустоек, однако изделие из высокочистого кварцевого волокна оказалось высокостойким к коррозии в алюминии при рабочих температурах. Это можно объяснить подавляющим влиянием кинетического фактора – низкой скорости диффузии кислорода в чистом стеклообразном оксиде кремния в рабочем диапазоне температур.

*Работоспособность и причины ее исчерпания*

Опыт использования оснастки для разлива алюминиевых сплавов из волластонитовой и высококремнеземной керамики в промышленных условиях показал, что оснастка выходила из строя в основном в результате механического разрушения, возникающего при монтаже и технологических перемещениях элементов при работе установки, а также вследствие образования наружных настывлей и замерзших участков расплава во внутренних каналах при колебаниях скорости разлива. Характерный вид механически поврежденного элемента традиционного волластонитового состава представлен на рис. 3.

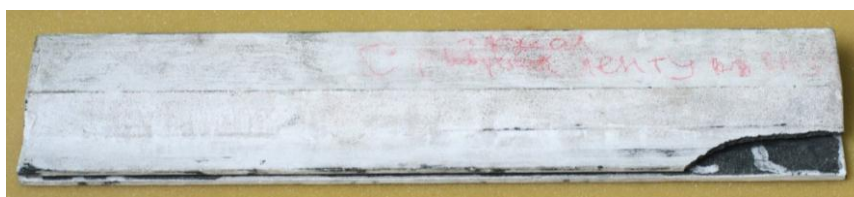


Рис. 3. Механически поврежденный стакан-кристаллизатор из волластонитовой керамики после эксплуатации на разливочной линии

Новый материал, имеющий высокую допустимую степень деформации и низкую тепло- и температуропроводность, показал существенные преимущества при практическом использовании – более высокую технологичность и долговечность. Результаты эксплуатационных испытаний материала показали, что благодаря высокой гибкости, обусловленной специфической структурой и составом, эксплуатационная стойкость материала при работе на литейно-прокатном агрегате оказалась существенно выше, чем волластонитовых аналогов. Кроме того, пониженная теплопроводность сократила вероятность образования настывлей и закупорки металлопровода. Полученный результат позволяет сделать вывод, что гибкость тонкостенных огнеупорных изделий является весьма существенным эксплуатационным свойством. На рис. 4 показано поведение образца материала из высококремнеземного волокна при воздействии изгибающей нагрузки, иллюстрирующее его высокую эксплуатационную гибкость.



Рис. 4. Образец оснастки с щелевым соплом из высококремнеземного волокна при воздействии изгибающей нагрузки

### Заключения

Термостойкая керамика востребована для изготовления плоских и фасонных изделий, используемых в горячих металлургических цехах в качестве расходных деталей литейных установок непрерывной разливки алюминиевых сплавов. Волластонитовая керамика, широко применяемая в настоящее время, имеет высокую плотность, а также недостаточные механическую прочность и теплоизоляционные свойства, что при длительной эксплуатации в контакте с расплавом алюминия приводит к разрушению тонкостенных изделий.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны высокопористые и термостойкие керамические материалы на основе кварцевых и кремнеземных волокон на «диффундирующем» боросиликатном связующем для использования в агрессивных химических средах при повышенных температурах. Материалы применяют как в качестве теплоизоляции для печей, так и для промышленной оснастки, в частности в литейном производстве.

Результаты длительной эксплуатации нового материала для изготовления оснастки машин непрерывной разливки алюминия показали, что кроме коррозионной устойчивости к воздействию расплава большое значение имеют теплоизоляционные свойства и устойчивость к неизбежным при монтаже и эксплуатации деформациям. Для сохранения работоспособности деталей допустимая степень деформации является более важным фактором, чем механическая прочность материала. Это связано с тем, что элементы оснастки конструктивно зафиксированы и их взаимные перемещения, неизбежно возникающие при работе литейных машин, могут быть скомпенсированы за счет безопасной упругой деформации материала.

При сравнимой стойкости к коррозионному воздействию алюминиевого расплава высококремнеземная керамика имеет более высокую эксплуатационную долговечность по сравнению с волластонитовой керамикой благодаря высокой прочности, и особенно допустимому удлинению при изгибе, а также низкой теплопроводности. При этом плотность высококремнеземной керамики в 2–3 раза ниже.

## Список источников

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // *Инновации*. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Оглодков М.С., Романенко В.А., Кожекин А.Е. Направления развития технологий плавки и литья алюминий-литиевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-51-62.
3. 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: 02.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
4. Воронов В.А., Чайникова А.С., Ткаленко Д.М. Особенности использования органических или водных связующих на основе оксидов элементов III или IV групп при изготовлении керамических форм для литья отливок из химически активных сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-73-84.
5. Лощинин Ю.В., Шорстов С.Ю., Кузьмина И.Г. Исследование влияния технологических факторов на теплопроводность материалов керамических форм для литья // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-89-94.
6. Антипина С.А., Верещагин В.И. Термостойкий материал для литья алюминия // *Известия Томского политехнического университета*. 2009. № 3. С. 8–11.
7. Способ изготовления керамических плавильных тиглей: пат. 2713049 Рос. Федерация; заявл. 17.12.18; опубл. 03.02.20.
8. Русанова Л.Н., Русин М.Ю., Горчакова Л.И. и др. Керамика из природного волластонита для литейных установок алюминиевой промышленности // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2008. № 5. С. 39–44.
9. Калугин В.Г., Костырев Ю.П., Куксин И.Г. Конструкционно-теплоизоляционные материалы и изделия на основе волластонита для алюминиевой промышленности // *Новые огнеупоры*. 2004. № 9. С. 8–9.
10. Гаращенко А.Н., Виноградов А.В., Кобылков Н.В., Никольчинкин А.А., Антипов Е.А. Экспериментальное и расчетное моделирование огне- и теплозащиты композиционных материалов в условиях высокотемпературного воздействия // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97.
11. Матренин С.В., Слосман А.И. *Техническая керамика: учеб. пособие*. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
12. Апакашев Р.А., Давыдов С.Я. Исследование взаимодействия расплавленного алюминия с контактной поверхностью кварцевого огнеупора // *Новые огнеупоры*. 2015. № 4. С. 46–48. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-4-46-48.
13. Максимов В.Г., Варрик Н.М. К вопросу получения химически стойкой кварцевой керамики с открытой пористостью // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2017. № 1. Ст. 01. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 10.10.2023).
14. Способ получения волокнистого керамического материала: пат. 2358954 Рос. Федерация; заявл. 08.11.07; опубл. 20.06.09.
15. Бабашов В.Г., Ивахненко Ю.А., Юдин А.В., Зимичев А.М. Керамический материал для деталей установок непрерывной разливки цветных сплавов // *Труды ВИАМ*. 2014. № 12. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-5-5.

## References

1. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
2. Oglodkov M.S., Romanenko V.A., Kozhekin A.E. Directions of development melting and casting technologies of aluminum-lithium alloys (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 02, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-51-62.

3. 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: October 02, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
4. Voronov V.A., Chaunikova A.S., Tkalenko D.M. Aspects of usage of organic or aqueous binders based on III or IV group elements oxides in the production of ceramic molds for chemically active alloys casting (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-73-84.
5. Loshchinin Yu.V., Shorstov S.Yu., Kuzmina I.G. Research of influence of technology factors on thermal conductivity of ceramic casting molds. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-89-94.
6. Antipina S.A., Vereshchagin V.I. Heat-resistant material for aluminum casting. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2009, no. 3, pp. 8–11.
7. *Method of manufacturing ceramic melting crucibles*: pat. 2713049 Rus. Federation; appl. 17.12.18; publ. 03.02.20.
8. Rusanova L.N., Rusin M.Yu., Gorchakova L.I. et al. Ceramics from natural wollastonite for foundry installations of the aluminum industry. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2008, no. 5, pp. 39–44.
9. Kalugin V.G., Kostyrev Yu.P., Kuksin I.G. Structural and thermal insulation materials and products based on wollastonite for the aluminum industry. *Novye ogneupory*, 2004, no. 9, pp. 8–9.
10. Garashchenko A.N., Vinogradov A.V., Kobylkov N.V., Nikolchenkin A.A., Antipov E.A. Experimental and computational modeling of fire and thermal protection composite materials under high-temperature exposure. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 02, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-84-97.
11. Matrenin S.V., Slosman A.I. *Technical ceramics*: textbook. Tomsk: Publishing House of TPU, 2004, 75 p.
12. Apakashev R.A., Davydov S.Ya. Study of the interaction of molten aluminum with the contact surface of a quartz refractory. *Novye ogneupory*, 2015, no. 4, pp. 46–48. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-4-46-48.
13. Maksimov V.G., Varrick N.M. On the issue of obtaining chemically resistant quartz ceramics with open porosity. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 1, art. 01. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: October 10, 2023).
14. *Method for producing fibrous ceramic material*: pat. 2358954 Rus. Federation; appl. 08.11.07; publ. 20.06.09.
15. Babashov V.G., Ivahnenko Yu.A., Yudin A.V., Zimichev A.M. Ceramic material for parts of continuous casting units intended for production of non-ferrous alloys. *Trudy VIAM*, 2014, no. 12, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 02, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-12-5-5.

*Информация об авторах*

**Варрик Наталья Мироновна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Максимов Вячеслав Геннадьевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Юдин Андрей Викторович**, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бабашов Владимир Георгиевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Natalia M. Varrick**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vyacheslav G. Maksimov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey V. Yudin**, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Vladimir G. Babashov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto: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.