
Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-3-12

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА ДЛЯ ЛИТЬЯ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Л.И. Рассохина¹, О.Н. Битюцкая¹, М.В. Гамазина¹, В.В. Авдеев¹

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

Аннотация. Выбраны и исследованы технологические параметры удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток. Представлены результаты данных исследований, на основе которых выбраны оптимальные технологические параметры и разработана технология удаления керамических стержней из плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток.

Ключевые слова: керамический стержень, восковая модель с керамическим стержнем, керамическая форма, отливка охлаждаемой турбинной лопатки

Для цитирования: Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Особенности разработки технологий изготовления и удаления керамических стержней на основе плавленного кварца для литья турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-3-12.

Scientific article

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR THE MANUFACTURE AND REMOVAL OF CERAMIC CORES BASED ON FUSED QUARTZ FOR CASTING TURBINE BLADES FROM SUPERALLOYS

L.I. Rassokhina¹, O.N. Bityutskaya¹, M.V. Gamazina¹, V.V. Avdeev¹

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

Abstract. Technological parameters of removal of ceramic cores based on fused quartz from the inner cavity of turbine blade castings are selected and investigated. The results of studies of technological parameters of removal of ceramic cores based on fused quartz are presented, according to the results of which optimal technological parameters are selected and a technology for removing ceramic rods from fused quartz from the inner cavity of turbine blade castings is developed.

Keywords: ceramic cores, wax model with ceramic core, ceramic mold, casting of cooled turbine blade

For citation: Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Avdeev V.V. Features of the development of technologies for the manufacture and removal of ceramic cores based on fused quartz for casting turbine blades from superalloys. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-3-12.

Введение

Основной задачей отечественного авиационного двигателестроения при разработке новых изделий и усовершенствовании существующих является повышение их КПД и ресурса работы. Увеличения значений рабочих характеристик изделий возможно достичь в том числе благодаря усовершенствованию конструкции турбинных лопаток в части ее системы охлаждения, что приведет к усложнению внутренней полости отливки турбинных лопаток и, как следствие, керамического стержня, оформляющего ее. Такой сложный керамический стержень, как правило, выполнен в виде многоканальной циклонно-вихревой матрицы с каналами толщиной до 0,6 мм.

Предприятия АО «ОДК» при изготовлении отливок турбинных лопаток для сложных и ответственных керамических стержней используют в основном стержневые составы на основе оксида алюминия (электрокорунда) различных фракций, обеспечивающие керамическим стержням гладкую поверхность (шероховатость $R_a \leq 5$ мкм), точность геометрических размеров (в пределах менее $\pm 0,15$ мм от номинальных), высокую прочность при температурах 20 ($\sigma_{в.изг}^{20^\circ} > 18$ МПа) и 1500 °С ($\sigma_{в.изг}^{1500^\circ} > 2,5$ МПа), а также высокую пористость ($P_{откр} \geq 30$ %). Однако удаление таких керамических стержней из внутренней полости отливки представляет собой сложную технологическую задачу.

Известным способом удаления сложного электрокорундового керамического стержня из внутренней полости отливки является удаление керамического стержня в расплавах солей бифторида и трифторида калия. Однако данный способ в настоящее время не применяется из-за токсичности выделяемых при технологическом процессе продуктов (анионов фтора), а также дефектов, которые выявляются на отливках после удаления керамического стержня: недопустимый растрав фазовых составляющих (металлической матрицы и межосных зон дендритов) жаропрочных никелевых сплавов и «свечение» при капиллярном (ЛЮМ) контроле на поверхности турбинных лопаток.

В производстве охлаждаемых турбинных лопаток наиболее широкое применение находит технология удаления керамических стержней в водных растворах щелочей. Однако удалить сложный керамический стержень на основе электрокорунда с выходной кромкой толщиной не более 0,4 мм практически невозможно. Наиболее эффективным является так называемый химико-гидравлический метод, сочетающий обработку отливок с керамическими стержнями щелочными растворами с промывкой струей воды высокого давления и обеспечивающий эффективное их удаление.

В настоящее время в производстве охлаждаемых турбинных лопаток широко используется технология удаления керамических стержней методом автоклавного удаления в концентрированных (до 70 %) и высокотемпературных (до 400 °С) водных растворах щелочей. Однако исследование влияния технологических параметров процесса удаления керамики автоклавным способом на образование растрыва поверхности турбинных лопаток показало, что при определенном сочетании технологических параметров на поверхности турбинных лопаток также наблюдаются выщелачивание эвтектических карбидов и травление упрочняющей γ' -фазы, что делает невозможным получение 100 % выхода годного отливок турбинных лопаток после удаления керамических стержней [1–15].

Обозначенные проблемы по удалению керамических стержней из электрокорунда обуславливают необходимость использования для их изготовления принципиально новых материалов, которые по своим основным физическим и технологическим свойствам (высокие прочность и стойкость к термическим ударам, химическая инертность к жаропрочным никелевым сплавам) соответствуют в

достаточной мере керамике из электрокорунда. Одним из таких керамических материалов является плавленный кварц (SiO_2) и стержневые составы на его основе, прочность которых при температуре 20°C и химическая инертность к жаропрочным никелевым сплавам соизмеримы с характеристиками стержневых составов на основе электрокорунда. Основное преимущество плавленного кварца и стержневых составов на его основе – растворимость в водных растворах щелочей [16–19].

По результатам исследований, ранее проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [17], выбраны оптимальный состав стержневой массы, технологические параметры изготовления (параметры прессования и высокотемпературного обжига) керамических стержней на основе плавленного кварца и разработана технология их изготовления для литья турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов.

Таким образом, разработка составов керамических стержней на основе плавленного кварца, технологий их изготовления и удаления является одним из приоритетных направлений, что отражено в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [20].

Материалы и методы

Проведена опытная работа по исследованию технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток. Для этого изготовлена стержневая керамическая масса на основе плавленного кварца, из нее отпрессованы керамические стержни отливок турбинных лопаток и произведен их обжиг. Отпрессованные керамические стержни («сырые» и после термической обработки) представлены на рис. 1.

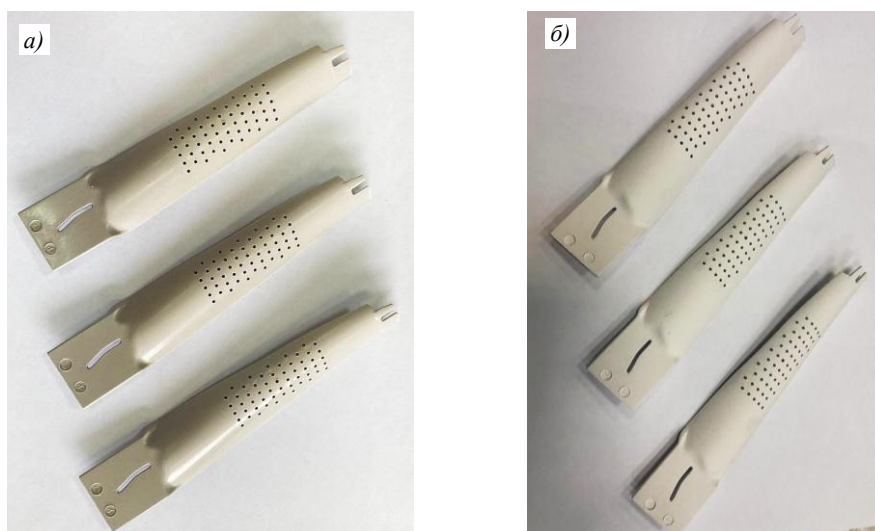


Рис. 1. Общий вид «сырых» керамических стержней после зачистки (а) и после термической обработки (б)

По результатам визуального контроля партии изготовленных керамических стержней и образцов-свидетелей из плавленного кварца определено, что на них отсутствуют дефекты типа «растрескивание», «спай», «поллом». На образцах-свидетелях проведены испытания основных характеристик керамических стержней, анализ результатов которых показал, что керамические стержни на основе плавленного кварца, изготовленные по разработанной технологии, имеют высокие значения предела прочности при изгибе при температурах 20 ($21,2$ МПа) и 1500°C ($2,95$ МПа), шероховатости ($R_a = 3,5$ мкм), открытой пористости ($\Pi_{\text{откр}} = 36,15\%$) и превосходят зарубежный

аналог производства Lanik Foam Ceramics (Чехия): по прочности – в 2,2 раза, открытой пористости – на 35 %. Изготовленные керамические стержни из плавленного кварца использованы для исследования технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток.

С применением керамических стержней из модельной композиции изготовлены восковые модели, собраны модельные блоки и изготовлены керамические формы по серийной технологии НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (рис. 2).

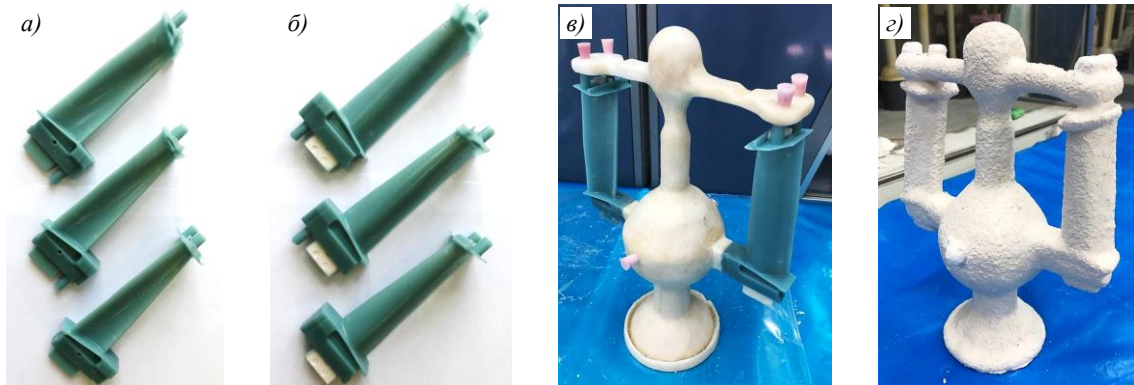


Рис. 2. Общий вид восковых моделей (а, б), модельных блоков (в) и керамических форм отливок турбинных лопаток (г)

На вакуумной плавильно-заливочной установке с печью предварительного нагрева керамических форм типа УППФ-У проведена заливка керамических форм отливок турбинных лопаток жаропрочным никелевым сплавом марки ВЖЛ21-ВИ.

Произведена отрезка отливок лопаток от элементов литниково-питающей системы залитого блока и выполнена пескоструйная очистка их поверхности от фрагментов керамической формы. Проведен визуальный контроль отливок турбинных лопаток на наличие металлургического дефекта типа «полом» керамического стержня в момент заливки и кристаллизации отливки.

Полома и выхода керамических стержней из плавленного кварца на отливках турбинных лопаток не выявлено (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид отливки турбинной лопатки с керамическим стержнем из плавленного кварца

По результатам визуального контроля отливок турбинных лопаток определено, что изготовленные из плавленного кварца керамические стержни обеспечили получение отливок турбинных лопаток без дефектов типа «полom стержня» и «выход стержня» [17].

Проведено исследование технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток. По результатам исследований, ранее проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, установлено, что наиболее эффективным способом удаления керамических стержней на основе плавленного кварца является химический метод, состоящий из обработки отливок со стержнями водными щелочными растворами (KOH или NaOH) с последующей промывкой внутренней полости отливок лопаток струей воды. Существует несколько способов применения водных щелочных растворов для удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок, однако наиболее часто применяемым является автоклавное удаление, которое имеет ряд преимуществ: возможность использования щелочных растворов низкой концентрации (20–40 %) при высоких температурах рабочего раствора (180–200 °С), снижение продолжительности цикла по сравнению с проведением процесса в открытых ваннах для выщелачивания, повышение степени контролируемости процесса в связи с автоматизацией и регистрацией параметров цикла.

Основной принцип удаления керамических стержней на основе плавленного кварца в автоклаве (реакторе) заключается в разрушении «связки» зерен плавленного кварца водным щелочным раствором при его нагреве до температуры 200 °С и давлении до 6 МПа. Керамический стержень при взаимодействии с водным щелочным раствором разупрочняется постепенно, при этом образовавшиеся продукты взаимодействия керамического стержня из плавленного кварца, представляющие собой «кашеобразную» массу, препятствуют дальнейшему растворению стержня и снижают скорость реакции. Благодаря продувке, выдержке и повторному повышению давления через определенные промежутки времени водный раствор щелочи закипает и создается «циркуляция» раствора в объеме автоклава, в процессе которой удаляются размягченные или отделившиеся частицы стержня и рабочий раствор обновляется возле его поверхности. Вследствие давления щелочь глубже проникает в стержень. В зависимости от геометрической формы, размеров стержня и состава керамики продолжительность цикла последовательной продувки, выдержки и нагнетания давления может варьироваться и составлять от 2 до 8 ч. По окончании цикла щелочной раствор сливают, отливки промывают водой для смыва остатков щелочи с поверхностей отливки и остатков керамического стержня перед извлечением из автоклава.

В результате исследования технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток в реакторе (автоклаве) высокого давления Premex Prator 5000 фирмы Premex (Швейцария) были отработаны следующие технологические параметры удаления керамических стержней: концентрация щелочи KOH рабочего раствора, температура рабочего раствора в реакторе во время цикла удаления, давление аргона в реакторе, продолжительность цикла выщелачивания.

После удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток в реакторе (автоклаве) высокого давления произведен визуальный контроль отливок турбинных лопаток на полноту удаления керамического стержня из внутренней полости отливки. По результатам визуального контроля выявлено, что отработанные технологические параметры удаления керамических стержней из плавленного кварца в реакторе (автоклаве) высокого давления Premex

Prator 5000 фирмы Premex обеспечили удаление керамических стержней из внутренней полости отливок турбинных лопаток. Проведена оценка полноты удаления керамических стержней из отливок турбинных лопаток неразрушающим методом контроля (рентгенографический контроль), по результатам которого определено, что во внутренней полости отливок турбинных лопаток отсутствуют фрагменты керамического стержня – керамический стержень удален на 100 % (рис. 4).

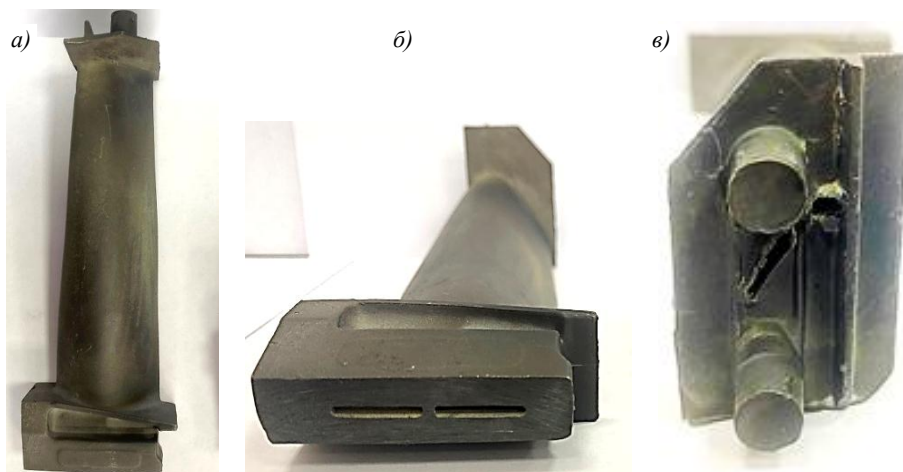


Рис. 4. Общий вид отливки турбинной лопатки со стороны спинки (а), основания замка (б) и бандажной полки (в) после удаления керамического стержня из внутренней полости отливки

Для определения оптимального количества допустимо возможных циклов удаления керамического стержня по разработанным технологическим параметрам в зависимости от конфигурации керамического стержня проведены исследования состояния наружной и внутренней поверхностей отливки турбинной лопатки после трех циклов удаления.

Проведено исследование микроструктуры поверхности фрагментов отливок турбинных лопаток для определения глубины их растрыва. Установлено, что по всему сечению исследуемой поверхности микрошлифа наблюдаются углубления размером до 20 мкм, вызванные, по-видимому, растрывом поверхности рабочим раствором. Растрыв носит локальный характер, его максимальный размер – до 25 мкм, что допустимо для отливок турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов равноосной кристаллизации. Структурных изменений в материале отливки вблизи ее внутренней поверхности не выявлено.

Проведено исследование характера взаимодействия рабочего раствора с поверхностью отливки турбинной лопатки, результаты которого показали, что химический состав поверхностного слоя соответствует материалу отливки; обеднения по химическому составу не выявлено.

По результатам проведенных металлографических исследований установлено, что разработанные технологические параметры обеспечивают 100 %-ное удаление керамических стержней на основе плавного кварца, а количество допустимо возможных циклов удаления керамического стержня без изменения и растрыва поверхности отливки составляет не менее 3.

Методики проведения исследований

Для оценки основных характеристик керамических стержней на основе плавного кварца проведены следующие исследования:

– определение прочности стержневой керамики при трехточечном изгибе при температурах 20 и 1500 °С на вакуумной установке ПРВ-302М согласно ГОСТ 473.8–81 и ГОСТ 25085–81 соответственно;

– определение открытой пористости согласно ГОСТ 2409–2014;

– определение шероховатости согласно ГОСТ 2789–73.

Для оценки удаления керамических стержней из отливок турбинных лопаток по разработанной технологии проведено исследование неразрушающим методом контроля – определение полноты удаления фрагментов керамического стержня рентгенографическим методом.

Для оценки состояния поверхности отливки турбинной лопатки после удаления керамического стержня выполнены исследования:

– микроструктуры поверхности фрагментов отливок турбинных лопаток методом растровой электронной микроскопии в соответствии с РТМ 1.2А-096–2000;

– характера взаимодействия рабочего раствора с поверхностью отливки турбинной лопатки методом электронно-зондового микроанализа на микроскопе в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015.

Результаты

По результатам проведенных исследований разработана технология удаления керамического стержня из плавленного кварца в реакторе (автоклаве) высокого давления Premex Prator 5000 фирмы Premex в водном растворе щелочи, которая позволила удалить керамический стержень из внутренней полости отливок турбинных лопаток полностью (на 100 %).

Обсуждение и заключения

Проведены исследования технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток. По результатам исследований, ранее проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, установлено, что наиболее эффективным способом удаления керамических стержней на основе плавленного кварца является автоклавное выщелачивание, состоящее из обработки отливок со стержнями водными щелочными растворами (КОН или NaOH) под давлением с последующей промывкой внутренней полости отливок лопаток струей воды. В результате исследования технологических параметров удаления керамических стержней на основе плавленного кварца из внутренней полости отливок турбинных лопаток в реакторе (автоклаве) высокого давления Premex Prator 5000 фирмы Premex (Швейцария) отработаны следующие технологические параметры: концентрация щелочи КОН рабочего раствора, температура рабочего раствора реактора, давление аргона в реакторе, продолжительность цикла выщелачивания.

Проведена оценка полноты удаления керамических стержней из отливок турбинных лопаток неразрушающим методом контроля (рентгенографический контроль), по результатам которой определено, что во внутренней полости отливки турбинной лопатки отсутствуют фрагменты керамического стержня.

Результаты исследования микроструктуры поверхности фрагментов отливок турбинных лопаток в части определения глубины их растрыва показали, что растрыв носит локальный характер, его максимальный размер – до 25 мкм, что допустимо для отливок турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов равноосной кристаллизации. Структурных изменений в материале отливки вблизи ее внутренней поверхности не выявлено.

Исследование характера взаимодействия рабочего раствора с поверхностью отливки турбинной лопатки показало, что химический состав поверхностного слоя соответствует материалу отливки; обеднения по химическому составу не выявлено.

По результатам проведенных металлографических исследований установлено, что разработанные технологические параметры обеспечивают 100 %-ное удаление керамических стержней на основе плавленного кварца, а количество допустимо возможных циклов удаления керамического стержня без изменения и растрыва поверхности отливки составляет не менее 3.

По результатам проведенных исследований разработана технология удаления керамического стержня из плавленного кварца в реакторе (автоклаве) высокого давления Premex Prator 5000 фирмы Premex в водном растворе щелочи, которая позволила удалить керамический стержень из внутренней полости отливок турбинных лопаток полностью (на 100 %).

Список источников

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н., Фоломейкин Ю.И., Демонис И.М. Высокоогнеупорные керамические формы и стержни для литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей // Междунар. науч.-практ. конф. «Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее»: сб. трудов. СПб.: Информация образования, 2003. Т. II. С. 49–56.
3. Беляков А.В., Разумнова И.В., Демонис И.М., Фоломейкин Ю.И. Легкоудаляемые керамические стержни для литья лопаток ГТД по выплавляемым моделям // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 26–31.
4. Ланда М.И., Копытов Н.Н. Влияние зернового состава порошковой композиции на свойства пористой корундовой керамики повышенной прочности // Огнеупоры. 1984. № 4. С. 21–25.
5. Бакунов В.С., Балкевич В.Л., Власов А.С. и др. Керамика из высокоогнеупорных окислов. М.: Металлургия, 1977. 304 с.
6. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. 208 с.
7. Фоломейкин Ю.И. Формирование структуры пористого высокоогнеупорного керамического материала зернистого строения // Стекло и керамика. 2015. № 8. С. 30–35.
8. Смесь для изготовления литейных керамических стержней полых лопаток из жаропрочных сплавов литьем по выплавляемым моделям: пат. 2691435 Рос. Федерация; заявл. 23.07.18; опубл. 13.06.19.
9. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 2273543 Рос. Федерация; заявл. 01.09.04; опубл. 10.04.06.
10. 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.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
12. Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 575–595. DOI: 10.18577/2071-91-40-2017-0-S-575-595.
13. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Рыкова Т.П., Мараховский П.С., Пахомкин С.И. Теплофизические свойства материалов керамики форм и стержней для литья лопаток ГТД из жаропрочных сплавов // Материаловедение. 2014. № 3 (204). С. 47–52.
14. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Оптимизация технологии изготовления керамических стержней для улучшения качества литых лопаток газотурбинных двигателей // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 3–4. Ст. 04. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 30.11.2020).

15. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Отработка технологии получения отливок лопаток ГТД методом направленной кристаллизации из сплавов на основе Nb–Si композита // Труды ВИАМ. 2017. № 4 (52). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-1-1.
16. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Исследование составов керамических стержней на основе плавленного кварца и технологии их изготовления // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
17. Фоломейкин Ю.И., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Высокоогнеупорная керамика стержней и форм для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурами // Авиационная промышленность. 2000. № 2. С. 41–44.
18. Способ удаления керамического материала из отливок деталей: пат. 2557119 Рос. Федерация; заявл. 12.03.14; опубл. 20.07.15.
19. Поклад В.А., Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Судинин М.А. Технология удаления керамических стержней из охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 9. С. 24–30.
20. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. *Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
2. Kablov E.N., Folomeikin Yu.I., Demonis I.M. Highly refractory ceramic molds and cores for casting cooled blades of gas turbine engines. *Intern. scientific-practical conf. «Science and technology of silicate materials – present and future»*. St. Petersburg: Information of Education, 2003, vol. II. pp. 49–56.
3. Belyakov A.V., Razumnova I.V., Demonis I.M., Folomeikin Yu.I. Easy-to-remove ceramic cores for investment casting of GTE blades. *Steklo i keramika*, 2012, no. 4, pp. 26–31.
4. Landa M.I., Kopytov N.N. Influence of the grain composition of the powder composition on the properties of porous corundum ceramics of increased strength. *Ogneupory*, 1984, no. 4, pp. 21–25.
5. Bakunov V.S., Balkevich V.L., Vlasov A.S. et al. *Ceramics from high-refractory oxides*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 304 p.
6. Strelov K.K. *Structure and properties of refractories*. Moscow: Metallurgy, 1982, 208 p.
7. Folomeikin Yu.I. Formation of the structure of a porous highly refractory ceramic material with a granular structure. *Steklo i keramika*, 2015, no. 8, pp. 30–35.
8. *A mixture for the manufacture of foundry ceramic cores of hollow blades from heat-resistant alloys by investment casting*: pat. 2691435 Rus. Federation; filed 23.07.18; publ. 13.06.19.
9. *Mixture for the manufacture of foundry ceramic rods*: pat. 2273543 Rus. Federation; filed 01.09.04; publ. 10.04.06.
10. 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.
11. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Highly efficient cooling of GTE hot section blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
12. Zuev A.V., Loshchinin Yu.V., Barinov D.Ya., Marakhovskij P.S. Computational and experimental investigations of thermophysical properties. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595.
13. Loshchinin Yu.V., Folomeikin Yu.I., Rykova T.P., Marakhovsky P.S., Pahomkin S.I. Thermophysical properties of ceramic materials of molds and rods for casting gas turbine engine blades from heat-resistant alloys. *Materialovedenie*, 2014, no. 3 (204). pp. 47–52.

14. Ospennikova O.G., Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V. Optimization of technology for the manufacture of ceramic rods to improve the quality of cast blades of gas turbine engines. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnologiya*, 2017, no. 3–4, paper no. 04. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: November 30, 2020).
15. Ospennikova O.G., Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V. Development of technology for production of castings by the method of directional solidification of GTE blades made of alloys based on Nb–Si composite. *Trudy VIAM*, 2017, no. 4 (52), paper no. 01 Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 30, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-1-1.
16. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Avdeev V.V. Research of compositions of ceramic rods based on fused quartz and their manufacturing technology. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
17. Folomeikin Yu.I., Kablov E.N., Demonis I.M. Highly refractory ceramics of rods and molds for casting blades with directional and single-crystal structures. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2000, no. 2, pp. 41–44.
18. *Method for removing ceramic material from casting parts*: pat. 2557119 Rus. Federation; filed 12.03.14; publ. 20.07.15.
19. Poklad V.A., Ospennikova O.G., Orlov M.R., Sudinin M.A. Technology for removal of ceramic rods from cooled blades of gas turbine engines. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2006, no. 9, pp. 24–30.
20. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Рассохина Лидия Ивановна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Гамазина Мария Васильевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Авдеев Валерий Валерьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lydia I. Rassokhina, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga N. Bityutskaya, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria V. Gamazina, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery V. Avdeev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.12.2021.

The article was submitted 25.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 01.12.2021.