
Научная статья

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

А.Б. Ечин¹, Г.И. Дейнега¹, А.Р. Нарский¹

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

Аннотация. Рассмотрены основные результаты научно-исследовательских работ, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в период с 2015 г. по настоящее время, в области создания новых материалов для литейных процессов жаропрочных никелевых сплавов. Налажено серийное производство и поставка на машиностроительные предприятия ряда материалов. Перспективной задачей становится организация малотоннажного производства лопаток для энергетических турбинных установок с целью решения проблемы импортозамещения и расширения отечественного производства.

Ключевые слова: лопатки газотурбинных двигателей, алюминат кобальта, поверхностное модифицирование, авиационное материаловедение, жаропрочные сплавы, равноосное литье, направленная кристаллизация

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.

Scientific article

NEW DEVELOPMENTS OF NRC «KURCHATOV INSTITUTE» – VIAM IN THE FIELD OF MATERIALS FOR CASTING PROCESSES OF SUPERALLOYS

A.B. Echin¹, G.I. Deynega¹, 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 main results of the research work carried out at the NRC "Kurchatov Institute" – VIAM in the period from 2015 to the present in the field of creating new materials for casting processes of nickel superalloys are considered. Serial production and supply of a number of materials to machine-building enterprises has been established. A promising task is the organization of low-tonnage production of blades for power turbine installations in order to solve the problem of import substitution and expansion of domestic production.

Keywords: blades of gas turbine engines, cobalt aluminate, surface modification, aviation materials science, superalloys, equiaxial casting, directional crystallization

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.

Введение

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития авиационного материаловедения в области совершенствования технологических процессов литья жаропрочных сплавов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является разработка перспективных материалов для литейных процессов, а также технологий их изготовления. Следует отметить особую актуальность работ, связанных со значительным вкладом в решение задач импортозамещения материалов и технологий в отечественной авиапромышленности.

Далее рассмотрены основные современные достижения в названной области. Они связаны с разработкой технологии изготовления керамических форм с использованием модификатора – алюмината кобальта, изготовленного из отечественных материалов, для получения лопаток из жаропрочных сплавов методом равноосного литья; новых составов модельных композиций; технологии изготовления пенокерамических фильтров с использованием отечественных материалов для очистки расплава от неметаллических включений при переплаве и разливке жаропрочных никелевых сплавов, а также исследованиями в области изготовления монокристаллических затравок и технологии изготовления керамических стержней на основе плавленного кварца. Разработаны также директивные технологические процессы для литья рабочих и сопловых лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами из жаропрочных сплавов.

Начало исследований в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов в ВИАМ

Освоение целого комплекса как научно-теоретических, так и технологических основ литья по выплавляемым моделям (или точного литья) во Всесоюзном (ныне – Всероссийском) научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) началось в 1960-х гг. Тогда в металлургической лаборатории и в лаборатории литья были разработаны связующие на основе этилсиликата для изготовления керамических оболочковых форм, а также воскообразные выплавляемые модельные составы на основе парафина и стеарина (типа ПС50-50). В те же годы проведены исследования в области точного литья деталей из высокопрочных сталей.

Возглавил направление работ по проблемам керамических стержней И.Д. Абрамсон, под его руководством были разработаны и впервые внедрены на моторостроительных заводах СССР технологические процессы изготовления обжиговых керамических стержней при литье лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). В работе принимали участие В.В. Князева, В.С. Шипилевская, З.С. Салибекова, И.В. Гордон и И.М. Демонис.

В лаборатории «Точного литья жаропрочных сплавов и сталей», организованной на основе сектора литья металлургической лаборатории, проводили разработку и внедрение жаропрочных сплавов, коррозионностойких и конструкционных сталей для точнолитых крупногабаритных деталей ответственного назначения в изделиях генеральных конструкторов: Н.Д. Кузнецова, С.П. Королева, А.М. Люльки, В.П. Глушко, А.Н. Туполева, С.В. Ильюшина и др.

Сотрудники лаборатории занимались также выплавкой сплавов в вакуумных индукционных литейных установках, разрабатывали составы моделей, оболочковых форм, связующих для изготовления суспензии. Первые работы проводили сотрудники: М.В. Сладкова, Е.П. Прозорова, М.Ф. Максимова, Н.И. Алексеева, Г.М. Ахрамеева [1].

Поверхностное модифицирование сплавов

В середине 1970-х гг. при освоении в опытном и серийном производстве авиационных турбинных двигателей IV поколения возникла проблема термоусталостного разрушения рабочих лопаток турбины высокого давления по причине низких значений

предела выносливости и термостойкости литейных жаропрочных сплавов [1]. В результате теоретического и экспериментального изучения процессов структурообразования при равноосной кристаллизации Е.Н. Кабловым был разработан оригинальный способ формирования однородной мелкозернистой структуры в поверхностных слоях охлаждаемой лопатки – поверхностное модифицирование сплавов [2]. Способ основан на введении в керамическую форму модификатора – алюмината кобальта, специально синтезированного для этих целей. Его применение, как подтвердили эксперименты, способствует изменению энергетического состояния поверхности оболочковой формы, приводящему к уменьшению угла смачиваемости в системе «керамика–расплав», снижению работы гетерогенного зародышеобразования, возрастанию скорости образования центров кристаллизации и, соответственно, увеличению их числа. Таким образом, на поверхности литейной формы формируются кристаллические соединения с кристаллографической структурой, близкой к структуре заливаемого металла. В результате в процессе кристаллизации сплава в отливке лопатки создается мелкозернистая структура [3].

Применение процесса поверхностного модифицирования с использованием алюмината кобальта дало возможность существенно повысить и стабилизировать уровень основных характеристик жаропрочных никелевых сплавов, в том числе предела выносливости и термостойкости, что обеспечило увеличение ресурса лопаток в 3–5 раз. Лопатки с поверхностным модифицированием позволили изготовить более пятнадцати типов авиадвигателей: Р-29-300, Р-35, РД-33, АЛ-21Ф-3, ПС-90, Р-79-300 и других для самолетов военного и гражданского назначения [1].

В технологическом процессе производства рабочих лопаток и сопловых секций с равноосной структурой ряда машино- и двигателестроительных промышленных предприятий Российской Федерации внедрено использование модификатора – алюмината кобальта. Особенную актуальность это имеет при литье турбинных лопаток стационарных газотурбинных установок. Практически единственным поставщиком алюмината кобальта является НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ), где организовано малотоннажное производство модификатора трех различных марок (АК-1, АК-2, АК-3), различающихся величиной площади удельной поверхности, соответственно: 4,5–6; 8–10 и 10–12 тыс. см²/г. Таким образом, названный модификатор является материалом стратегического назначения. Алюминат кобальта синтезируют из трех основных компонентов – электрокорунда (оксида алюминия Al₂O₃), оксида кобальта (II, III) CoO·Co₂O₃ и кобальта углекислого основного водного CoCO₃·mCo(OH)₂·nH₂O.

Производимый в ВИАМ высокочистый алюминат кобальта (рис. 1) отличается высоким качеством, имеет минимальное содержание щелочных примесей; свободного кобальта в порошке – не более 2 %, что позволяет исключить его взаимодействие с расплавленным металлом и получить отливку без поверхностных дефектов. Следует добавить, что в технологии изготовления модификатора используются исходные материалы с низким (<0,0008 %) содержанием щелочных металлов, что приводит к увеличению продолжительности жизненного цикла суспензии при изготовлении керамических форм. Основными потребителями модификатора – алюмината кобальта – в настоящее время являются следующие предприятия: ПАО «ОДК-Сатурн», ПАО «УМПО», АО «ММП имени В.В. Чернышева», ПАО «КАДВИ», АО «КМПО», АО «ОМКБ», ООО «Точка плавления», филиал АО «Газэнергосервис» – завод «Турбодеталь» имени И.И. Соколовского, АО «Протон-ПМ»; корпорация АО «ОДК». По данным 2022 г., потребность в алюминате кобальта в среднем по отрасли составляет порядка трех тонн в год.



Рис. 1. Модификатор – алюминат кобальта

В 2021 г. потребовалось оперативное решение проблемы импортозамещения, обусловленное тем, что один из исходных компонентов (оксид кобальта) имел импортное происхождение – его изготавливает фирма Freeport Cobalt Oy (Финляндия). В результате разработана технология изготовления литейных форм с использованием алюмината кобальта, полученного из отечественных материалов. При этом использовали оксид кобальта, производимый в РФ предприятиями: ООО НПФ «Балтийская мануфактура» и ООО «УНИХИМ».

Керамические формы во время экспериментальных исследований изготавливали с применением готовых связующих на водной основе Армосил KS и Армосил AM. Первое из них использовалось исключительно для лицевого слоя: обладая высокими адгезионными свойствами к модельным составам, оно обеспечивало высокий класс чистоты поверхности отливок и снижало вероятность пригара. Второе – сообщало хорошие прочностные характеристики керамике и применялось для последующих слоев оболочковой формы. Названные связующие, наряду с экологической безопасностью, обеспечивают такие преимущества, как длительная живучесть и седиментационная устойчивость суспензий [4].

Проведенный после обработки в бойлерклаве и прокалики визуальный контроль качества керамических форм показал полное отсутствие дефектов в виде трещин и отслоений.

Затем на плавильно-заливочной установке УППФ-У проводили заливку форм жаропрочным сплавом ЖС6У-ВИ для получения лопаток ГТД с равноосной структурой, а затем оценивали макроструктуру лопаток.

Результаты исследования предела прочности сплава ЖС6У-ВИ при растяжении при температуре 20 °С и длительной прочности на базе 40 ч показали полное соответствие ОСТ 1 90126–85.

При визуальной проверке на всех отлитых и протравленных лопатках макроструктура оказалась разнотельной с ориентировочным размером макротельны от 0,5 до 5 мм, что является вполне характерным для равноосного литья по выплавляемым моделям.

Таким образом, установлена возможность применения отечественного оксида кобальта вместо импортного (финского производства). Разработана новая технологическая инструкция «Изготовление керамических форм с применением модификатора алюмината кобальта для литья отливок с равноосной структурой».

Внедрение результатов работы в технологию производства алюмината кобальта в ВИАМ привело к снижению себестоимости продукции [5].

Модельные композиции

В Советском Союзе в промышленности при литье по выплавляемым моделям находили применение воскообразные выплавляемые модельные составы на основе парафина и стеарина, такие как ПС50-50 и ПС70-30. Несмотря на хорошие реологические свойства в пастообразном состоянии, эти составы отличались небольшой

теплостойкостью. Более того, стеарин мог вступать в реакцию с растворителями этилсиликатного связующего.

Применение новых составов, включавших синтетические полимеры и полиэтиленовые воски (например, ПВ-200), обеспечивало получение более точных моделей, не взаимодействующих с компонентами суспензии и водой при их удалении из оболочковой формы. Один из самых известных составов – ВИАМ-102 [6].

Значительное усложнение геометрической конфигурации отливок деталей ответственного назначения, повышение требований к размерной точности и качеству литой поверхности детали требовали совершенствования технологии литья по выплавляемым моделям, в том числе улучшения технологических возможностей и оптимизации составов модельных композиций, на что и были направлены научно-исследовательские работы ВИАМ [7]. Были выработаны требования к свойствам модельных композиций; отработана методика определения текучести (или ее обратной величины – вязкости), характеризующей, в частности, полноту удаления из формы: чем быстрее плавится модельная композиция, тем лучше заполняется пресс-форма и легче происходит удаление модельного состава из формы; установлены допустимые температурные режимы запрессовки модельных композиций [8]; изучено влияние количества составляющих компонентов на технологические свойства модельных композиций [9]; исследовано влияние наполнителей на стабильность модельных композиций, проведен анализ влияния терефталевой кислоты на физико-механические характеристики композиций [10].

Применение современных модельных композиций направлено на замену иностранных, все еще используемых на металлургических заводах. Более того, отечественные композиции обладают относительно невысокой температурой плавления, хорошей текучестью, минимальными усадкой и зольностью, инертностью к материалам керамической формы, достаточно высокой прочностью при статическом изгибе, теплоустойчивостью, устойчивостью к образованию трещин, экологической безопасностью и отсутствием специфического запаха.

В настоящее время модельные композиции нового поколения (общего состава: воски, полимеры, смолы с улучшенными и стабильными характеристиками) позволяют изготавливать выплавляемые модели для деталей сложной конфигурации, обеспечивают импортнезависимость и технологическую безопасность. В 2015 г. в ВИАМ был организован участок мощностью 60 тонн в год по изготовлению модельных композиций, таких как Салют-1, Салют-2, Салют-3 и Салют-4, а также более совершенных составов: ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-4, ВИАМ МК-Л – на основе отечественного сырья (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент линии изготовления модельных композиций

Осуществление поставок возможно как в брикетах, так и в гранулах, для чего введена в эксплуатацию линия гранулирования для модельных композиций STP-WGL-1 (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Линия гранулирования STP-WGL-1

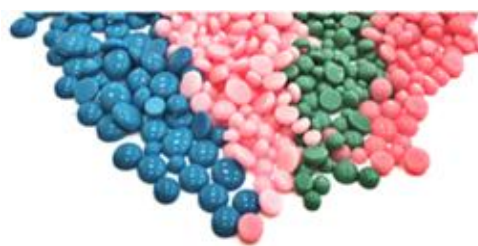


Рис. 4. Гранулы модельных композиций

Композиции серии ВИАМ, характеристики которых приведены в таблице, легко поддаются корректировке параметров прессования – изменение температуры, давления, скорости запрессовки не влечет за собой ухудшения технологических свойств воска.

Физико-механические свойства модельных композиций серии ВИАМ

Свойства модельных композиций	Значения свойств для модельных композиций			
	ВИАМ МК-Л	ВИАМ МК-1	ВИАМ МК-2	ВИАМ МК-4
Предел прочности при статическом изгибе, МПа, при температуре 20 ± 1 °С (не менее)	4,5	7	8	4
Теплоустойчивость, °С (не менее)	35	42	48	40
Температура каплепадения, °С	60–70	80–90	85–95	50–70
Массовая доля золы, % (не менее)	0,05	0,05	0,05	0,05

Основными потребителями модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ являются следующие предприятия: ПАО «УМПО», АО «КМПО», АО «МПО «Металлист», филиал ПАО «ОДК-Сатурн» – ОМКБ, ООО «Башполимерхим», ФГУП «ВНИИА».

Серийное изготовление монокристаллических затравок

В современных авиационных двигателях рабочие лопатки турбины находятся при максимально высоких температурах и испытывают наибольшее напряжение [11]. Лопатки изготавливают из никелевых жаропрочных сплавов методами точного литья по выплавляемым моделям.

Преимущество по рабочим характеристикам имеют лопатки с монокристаллической структурой, для получения которых в ВИАМ разработана технология направленной кристаллизации и формирования структуры отливки с помощью затравки. В 1970-х гг. в ВИАМ разработана затравочная технология монокристаллического литья жаропрочных сплавов. Для турбинных лопаток В.Н. Толорайя разработал тугоплавкую затравку на основе бинарного сплава никель-вольфрам с температурой ликвидус на 120–140 °С выше, чем у никелевого жаропрочного сплава с традиционным легированием [1, 12].

Проведены исследования [13] по составу затравочного сплава, температурно-скоростным параметрам направленной кристаллизации затравочных заготовок, разработан модельный блок под заливку на установке направленной кристаллизации с жидкометаллическим кристаллизатором, проведены исследования по травлению затравок и затравочных заготовок для выявления их структуры и разбраковки, рентгеноструктурному и металлографическому анализу кристаллографической ориентации затравочных заготовок для их разметки под ориентированную вырезку затравок, рентгеноструктурному анализу для аттестации затравок от одной затравочной заготовки, металлографическому анализу структуры затравки с целью определения и разметки азимутального направления [100] на рабочей поверхности монокристаллических затравок [001].

Установлены и опробованы максимально допустимые отклонения от заданной кристаллографической ориентации на монокристаллических затравках и затравочных заготовках, которые составляют: на затравочных заготовках – не более 25 градусов, на затравках – не более 5 градусов. Указанные параметры определяются рентгеноструктурным методом на дифрактометрах типа ДРОН с использованием гониометрической приставки для исследования кристаллографических текстур [14, 15].

Проводились также исследования по введению в состав затравочного сплава углерода до 0,08 % (по массе) для повышения структурной стабильности материала относительно возникновения дефекта полосчатости на монокристаллических отливках.

В настоящее время по затравочной технологии разработаны производственные и технологические инструкции на изготовление монокристаллических затравок из сплавов систем «никель–вольфрам» (Ni–W) и «никель–вольфрам–углерод» (Ni–W–C), а также технические условия на монокристаллические затравки из сплава системы Ni–W.

Применение тугоплавких затравок из сплава системы Ni–W упрощает проведение процесса литья, повышает его надежность как в проходных печах типа ПМП-2, так и в высокоградиентных установках типа УВНК-9А, применяемых на отечественных заводах.

В 2019 г. в ВИАМ организовано изготовление и поставка на предприятия отрасли монокристаллических затравок с кристаллографической ориентацией [001] из сплава системы Ni–W для получения монокристаллических лопаток из современных жаропрочных никелевых сплавов (рис. 5).

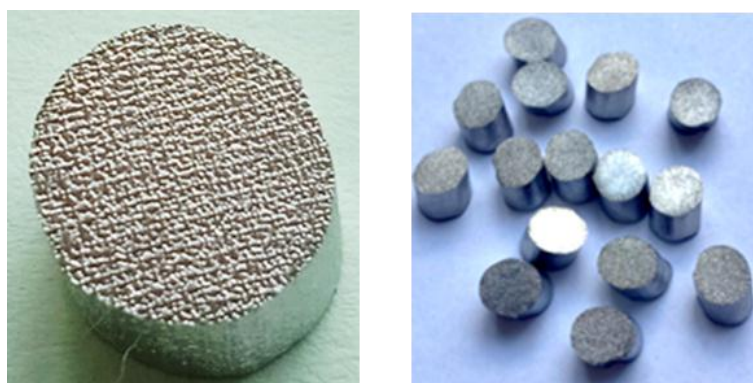


Рис. 5. Монокристаллические затравки из сплава системы Ni–W

Фильтрация жаропрочных сплавов от неметаллических включений

В 2022 г. в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология изготовления пенокерамических фильтров на основе отечественных огнеупорных материалов: оксидов алюминия (III) Al_2O_3 и циркония (IV) ZrO_2 . Оксид циркония (IV) – это особо перспективный материал, имеющий высокие прочностные характеристики и огнеупорность [16].

Ранее для фильтрации расплава от неметаллических включений при переплаве и разливке жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ в серийном производстве применяли импортные фильтры STELEX ZR (Германия).

Проведенный анализ специализированной и патентной научно-технической литературы, изучение и подбор методов изготовления фильтров, выбор исходных материалов и спекающих добавок позволили отработать технологические параметры нанесения суспензии из микропорошков Al_2O_3 и ZrO_2 и связующих на водной основе на полиуретановую пористую модель с заданным размером ячейки.

Разработаны технологические параметры изготовления пенокерамических фильтров с использованием отечественных материалов, изготовлены экспериментальные образцы и определен ряд их физико-механических свойств. Пенокерамические фильтры нескольких типов полностью соответствовали требованиям технического задания на научно-исследовательскую работу.

Образцы созданных пенокерамических фильтров опробованы при переплаве и разливке сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ с помощью специальной вакуумной печи. Все фильтры выдержали термический удар без разрушения и сохранили пропускную способность.

Оценена загрязненность сплавов неметаллическими включениями, проведен анализ химического состава сплавов, включая определение содержания кислорода, азота и циркония до и после фильтрации, проведены испытания на определение механических свойств и длительную прочность сплавов.

Установлено, что переплавы жаропрочных сплавов ЖС6У-ВИ и ВХ4Л-ВИ, полученные с применением разработанных пенокерамических фильтров на основе отечественных огнеупорных оксидных материалов, полностью соответствуют требованиям ОСТ 1 90126–85.

Основными потенциальными потребителями разработанной технологии являются моторостроительные предприятия АО «ОДК», машиностроительные предприятия топливно-энергетического комплекса России, предприятия космической отрасли Госкорпорации «Роскосмос» и другие.

Разработанная технология изготовления пенокерамических фильтров позволяет провести импортозамещение фильтров VESUVIUS UK (Великобритания), применяемых при выплавке литой прутковой заготовки из жаропрочных никелевых сплавов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Керамические стержни на основе плавленного кварца

Керамические стержни применяют для получения в отливках протяженных узких сложных полостей или отверстий, в том числе в полых охлаждаемых лопатках [6, 17]. Для отливки деталей из никелевых жаропрочных сплавов чаще всего используют спеченные стержни на основе оксидов алюминия (III), кремния (IV) и циркония (IV).

К стержням предъявляют высокие требования по геометрической точности, огнеупорности, термодинамической устойчивости в диапазоне температур расплава сплава, механическим и теплофизическим свойствам (высокая прочность, в том числе при высокой температуре, стойкость к термическим ударам при заливке сплава в форму, легкоудаляемость из внутренней полости отливок, химическая инертность к жаропрочным сплавам и к керамическим материалам).

В настоящее время разработка составов и технологий изготовления керамических стержней для обеспечения высокоэффективной системы охлаждения представляет сложную задачу. При использовании стержней на основе электрокорунда существует проблема удаления керамического стержня из внутренней полости отливки.

Так, в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведено исследование по изучению возможности изготовления керамических стержней на основе плавленного кварца (SiO_2) для равноосной кристаллизации отливок лопаток ГТД (рис. 6 и 7) [18].



Рис. 6. Отливка лопатки, содержащая керамический стержень из плавленного кварца



Рис. 7. Прокаленные керамические стержни

Разработаны состав и технология изготовления керамических стержней на основе плавленного кварца. Изготовлена опытная партия керамических стержней. Технология опробована в производстве отливок лопаток с равноосной кристаллизацией из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21-ВИ.

Одним из преимуществ стержневых составов на основе плавленного кварца является их легкоудаляемость в водных растворах щелочей (гидроксида калия КОН) с последующей промывкой внутренней полости отливок лопаток струей воды.

Керамические стержни удалялись из внутренней полости отливок лопаток в реакторе высокого давления Premex. Визуальный и рентгенографический контроль показал 100%-ное удаление стержней [19].

Таким образом, применение керамических стержней на основе плавленного кварца в серийном производстве для изготовления отливок лопаток из жаропрочных сплавов методом равноосной кристаллизации является перспективным направлением.

Директивные технологические процессы

В 2018–2019 гг. проведен анализ действующей нормативной документации получения отливок рабочих и сопловых лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами из жаропрочных никелевых сплавов на моторостроительных предприятиях АО «ОДК», в 2019–2020 гг. разработаны требования к материалам и технологическим процессам изготовления литых лопаток турбин на каждой стадии производства.

На основе анализа разработаны два директивных технологических (базовых) процесса: «Литье лопаток газотурбинных двигателей с монокристаллической и направленной структурами из жаропрочных никелевых сплавов» и «Литье лопаток газотурбинных двигателей с равноосной структурой из жаропрочных никелевых сплавов». Они являются единой технической документацией при производстве литых охлаждаемых лопаток. Создание на основе директивных технологических процессов технологий в действующих литейных цехах, при модернизации цехов, а также при проектировании новых цехов литья лопаток ГТД позволит строго регламентировать последовательность изготовления и контроля по всему процессу изготовления литых деталей ГТД, осуществлять централизованно закупку оборудования и материалов схожей номенклатуры для отработанных технологических процессов.

Заключения

Рассмотрены результаты приоритетных исследовательских работ, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов: поверхностное модифицирование структуры отливок из жаропрочных сплавов, модельные композиции для литья по выплавляемым моделям, монокристаллические затравки, пенокерамические фильтры, керамические стержни на основе плавящего кварца, разработка директивных технологических процессов литья лопаток ГТД.

Исследования проводятся в рамках реализации комплексных научных проблем 9.5. «Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов» и 9.6. «Технологии изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20].

В настоящее время первостепенной задачей становится необходимость организации малотоннажного производства и трансфера технологий изготовления лопаток энергетических турбинных установок с целью импортозамещения и расширения выпуска отечественной продукции.

Работа выполнена при поддержке оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. 520 с.
2. Каблов Е.Н. Повышение эксплуатационных характеристик литых лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов путем управления процессом структурообразования при кристаллизации: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. М.: МГАТУ им. К.Э. Циолковского, 1995. 60 с.
3. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
4. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Применение модификатора – алюмината кобальта при литье лопаток газотурбинных двигателей. Часть 1 // Литейное производство. 2022. № 3. С. 15–19.
5. 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>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-3-14.
6. Литье по выплавляемым моделям / Под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
7. Оспенникова О.Г., Каблов Е.Н., Шункин В.Н. Разработка и исследование пластификатора для модельных композиций на основе природных восков // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 3. С. 68–70.
8. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.
9. Асланян И.Р., Рассохина Л.И., Оспенникова О.Г. Определение количественных факторов, существенно влияющих на технологические характеристики модельных композиций // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
10. Оспенникова О.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
11. 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.

12. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Изучение механизма зарождения монокристаллов из Re-Ru-содержащих никелевых жаропрочных сплавов с заданной пространственной кристаллографической ориентацией от затравок системы Ni–W–Re–C с температурой ликвидуса 1550–1600 °С // Вопросы материаловедения. 2023. (в печати).
13. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации // Вопросы материаловедения. 2021. № 2 (106). С. 55–65.
14. Висик Е.М., Герасимов В.В., Колядов Е.В., Кузьмина Н.А. Влияние технологических режимов литья на параметры структуры монокристаллов новых жаропрочных сплавов // Металлургия машиностроения. 2016. № 5. С. 27–31.
15. Кузьмина Н.А. Ростовые структурные дефекты в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-15-26.
16. Соколов А.В., Дейнега Г.И., Кузьмина Н.А., Кузьмина И.Г. Структурно-механические свойства композиционного материала на основе частично стабилизированного диоксида циркония, допированного алюмомагнезиальной шпинелью // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.05.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-78-85.
17. Фоломейкин Ю.И., Каблов Е.Н., Демонис И.М. Высокоогнеупорные керамические стержни и формы для литья лопаток методом направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2003. № 1. С. 33–44.
18. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Исследование составов керамических стержней на основе плавного кварца и технологии их изготовления // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
19. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Исследование основных характеристик керамических стержней на основе плавного кварца для изготовления отливок лопаток авиационных двигателей // Литейное производство. 2022. № 10. С. 26–30.
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. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
2. Kablov E.N. *Improving the performance of cast blades of gas turbine engines from heat-resistant nickel alloys by controlling the process of structure formation during crystallization*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Moscow: MGATU im. K.E. Tsiolkovsky, 1995, 60 p
3. *Cast blades of gas turbine engines: alloys, technologies, coatings*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
4. Narsky A.R., Deinega G.I., Kuzmina I.G. The use of a modifier - cobalt aluminate in the casting of blades of gas turbine engines. Part 1. *Liteynoye proizvodstvo*, 2022, no. 3, pp. 15–19.
5. Narsky A.R., Deinega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
6. *Lost wax casting*. Eds. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov. 3Rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 408 p.
7. Ospennikova O.G., Kablov E.N., Shunkin V.N. Development and research of a plasticizer for model compositions based on natural waxes. *Aviation materials and technologies*, 2002, no. 3, pp. 68–70.
8. Ospennikova O.G. Research and working out of parameters of technological process of manufacturing of models from modelling compositions on the basis of synthetic waxes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.

9. Aslanyan I.R., Rassokhina L.I., Ospennikova O.G. Definition of quantitative factors, significantly influencing on technological characteristics of model compositions). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
10. Ospennikova O.G. Influence research of fillers on properties and stability of modelling compositions, a choice of optimum structures. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
11. 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.
12. Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Studying of the mechanism of origin of monocrystals from Re–Ru-containing nickel heat resisting alloys with the set spatial crystallographic orientation from Ni–W–Re–C system primings with a temperature likvidusa 1550–1600 °C. *Voprosy materialovedeniya*, 2023 (in print).
13. Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Obtaining single-crystal seeds [001] from alloys of the Ni–W system by the method of directed crystallization. *Voprosy materialovedeniya*, 2021, no. 2 (106), pp. 55–65.
14. Visik E.M., Gerasimov V.V., Kolyadov E.V., Kuzmina N.A. Influence of technological modes of casting on the parameters of the structure of single crystals of new heat-resistant alloys. *Metallurgiya mashinostroyeniya*, 2016, no. 5, pp. 27–31.
15. Kuzmina N.A. Growth structural defects in single crystals of nickel heat-resistant alloys. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-15-26.
16. Sokolov A.V., Deynega G.I., Kuzmina N.A., Kuzmina I.G. Structural and mechanical properties of a composite material based on partially stabilized zirconium dioxide doped with magnesium aluminate spinel. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-78-85.
17. Folomeikin Yu.I., Kablov E.N., Demonis I.M. Highly refractory ceramic rods and molds for casting blades by directional crystallization. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2003, no. 1, pp. 33–44.
18. 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: May 14, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
19. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Avdeev V.V. Investigation of the main characteristics of ceramic rods based on fused quartz for the manufacture of castings for aircraft engine blades. *Liteynoye proizvodstvo*, 2022, no. 10, pp. 26–30.
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». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Ечин Александр Борисович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

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

Information about the authors

Alexander B. Echin, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 26.05.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.06.2023.
The article was submitted 26.05.2023; approved and accepted for publication after reviewing 01.06.2023.