
Научная статья

УДК 621.74.043.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-3-13

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

Т.Л. Форостович¹, А.Р. Нарский¹, О.Н. Битюцкая¹, Н.А. Мокеев¹

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

Аннотация. Представлен обзор материалов, связанных с технологическим процессом производства современных модельных композиций для литья по выплавляемым моделям ответственных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Рассматриваются общие характеристики модельных композиций, включая состав и основные требования к ним, а также вопросы деятельности производственного участка, созданного в середине 2010-х гг. и выпускающего широкий ассортимент высококачественных модельных композиций на основе отечественного сырья.

Ключевые слова: модельные композиции, воск, парафин, пластификатор, нефтеполимерная смола, алифатическая смола, точное литье, жаропрочные сплавы

Для цитирования: Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н., Мокеев Н.А. Изготовление модельных композиций для литья по выплавляемым моделям в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-3-13.

Scientific article

PRODUCTION OF MODEL COMPOSITIONS FOR INVESTMENT CASTING IN THE NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE» – VIAM

T.L. Forostovich¹, A.R. Narsky¹, O.N. Bityutskaya¹, N.A. Mokeev¹

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 article presents an overview of materials related to the technological process of production of modern model compositions for casting of critical parts of gas turbine engines from nickel superalloys made by the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. The general characteristics of model compositions are considered, including the composition and basic requirements for them, as well as issues of the activity of the manufacturing area established in the mid-2010s and producing a wide range of high-quality model compositions based on domestic raw materials.

Keywords: model compositions, wax, paraffin, plasticizer, petroleum polymer resin, aliphatic resin, precision casting, superalloys

For citation: Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N., Mokeev N.A. Production of model compositions for investment casting in the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-3-13.

Введение

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) – ведущий научно-исследовательский институт Российской Федерации (РФ), обладающий передовыми научными разработками и высококвалифицированными кадрами. В институте создается разнообразная номенклатура материалов, предназначенных в первую очередь для ответственных изделий авиационно-космической техники и машиностроения, а также разрабатываются и совершенствуются технологические процессы их изготовления. Условия эксплуатации, включая возможное воздействие высоких нагрузок, экстремальных температур, агрессивных сред, электромагнитных излучений, определяют ряд жестких требований к материалам. При этом обязательно должны быть соблюдены гарантии весовой эффективности и достижения повышенных показателей надежности и ресурса работы [1].

Важнейшими элементами газотурбинных двигателей и энергетических установок являются детали турбин, изготавливаемые методом точного литья, называемым также методом литья по выплавляемым моделям, который обеспечивает необходимые точность и шероховатость внутренних полостей полученных отливок [2].

Процесс получения литых деталей состоит из следующих технологических стадий [3]. В пресс-формах изготавливают модели деталей и литниково-питающей системы, для чего используют легкоплавкие воскообразные или водорастворимые модельные составы. Полученные модели соединяют в блоки. Затем послойно наносят керамическую суспензию, состоящую из связующего и огнеупорного порошка – наполнителя, каждый слой для упрочнения обсыпают огнеупорным шлиф-порошком и просушивают в определенных условиях. Из полученной керамической оболочки, называемой оболочковой формой, удаляют (чаще всего выплавляют или растворяют) модельный состав. Форму прокаливают при высокой температуре и заливают жаропрочным сплавом.

Таким образом, керамическая форма служит непосредственно для формообразования наружного профиля отливки, следовательно, точность и стабильность размеров литых лопаток напрямую зависят от качества исходных материалов, а особенно от физико-механических характеристик и технологических свойств модельных составов [4–6].

К свойствам жаропрочных никелевых сплавов – основному материалу для литых лопаток современных перспективных двигателей – предъявляют требования по жаропрочности, жаростойкости, длительной прочности при высоких температурах и теплостойкости [7, 8].

В результате комплекса научно-исследовательских и технологических работ, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ совместно с предприятиями авиационной промышленности, созданы промышленные вакуумные установки и разработаны технологии получения турбинных лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами для современных авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок [8]. Направленная кристаллизация, по сравнению с равноосным литьем, способствует улучшению рабочих характеристик литых деталей из жаропрочного сплава, так как исключает наличие поперечных границ зерен, а в случае монокристаллического литья – полностью устраняет границы зерен [9–13].

Общая характеристика модельных композиций, применяемых для получения литых ответственных деталей

Современные модельные композиции, применяемые в литье по выплавляемым моделям для изготовления деталей газотурбинных двигателей, должны обладать рядом специфических свойств:

- температура плавления 60–100 °С, обеспечивающая наилучшую заполняемость пресс-формы;
- оптимальная текучесть для максимально точного воспроизведения конфигурации модели и более полного ее удаления из оболочковой формы;
- инертность к огнеупорным материалам формы;
- прочность при статическом изгибе при температуре 20 ± 1 °С – от 4 до 8 МПа для недопустимости деформации моделей;
- теплоустойчивость – способность сохранять эксплуатационные свойства до температуры не менее 35–40 °С;
- высокая смачиваемость суспензией;
- минимальная зольность (0,05 %) для полного выгорания при обжиге форм во избежание брака отливок «по засору», определяемая как твердый остаток после сжигания определенной массы композиции;
- минимальная и стабильная свободная линейная усадка (не более 0,6–0,84 %) для обеспечения геометрической точности отливок;
- минимальная продолжительность затвердевания, т. е. высокая теплопроводность;
- экологическая безопасность и большой срок годности [5, 14, 15].

Модели деталей изготавливают запрессовкой пастообразного модельного состава в пресс-форму с последующей выдержкой для охлаждения модели [16]. Полностью технологический процесс производства модельных композиций в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ состоит из следующих стадий:

- входной контроль исходных материалов;
- приготовление концентрата красителя;
- изготовление модельных композиций;
- контроль качества модельных композиций;
- маркировка, упаковка и хранение готовой продукции.

Все операции технологического процесса изготовления модельных композиций приведены в технологическом паспорте в строгом соответствии со стандартом организации.

Изначально при литье по выплавляемым моделям применяли воскообразные модельные составы на основе парафина и стеарина с вариантами добавления этилцеллюлозы, а затем стали вводить улучшающие теплоустойчивость и прочность добавки в виде синтетических полимеров – например, полиэтиленового воска марок ПВ-200 и ПВ-300 [3]. Модельные композиции нового поколения содержат обычно порядка десяти компонентов синтетических материалов:

- основа – твердые алканы (парафин, церезин);
- упрочняющие компоненты – полимерные смолы (нефтеполимерные, термополимерные);
- полимеры, увеличивающие трещиностойкость (например, сэвилены);
- а также:
- пластификаторы, повышающие стабильность поведения модельного состава при запрессовке;
- присадки – поверхностно-активные вещества, которые при добавлении в малых количествах существенно улучшают технологические свойства (например, агидол);

– красители, необходимые для отличия марок композиций между собой;
– наполнители, увеличивающие прочность, твердость и стабильность размеров готовых моделей (например, аэросил, фторопласт, терефталевая кислота).

Часто в состав модельных композиций в качестве пластификатора вводят такое недорогое и распространенное сырье, как канифоль, в частности, модифицированную алканоламинами, что способствует увеличению прочности и теплоустойчивости состава [3]. Так, в 2016 г. в Беларуси доработан состав марки ЗГВ-101 на основе нефтеполимерного сырья и модифицированной канифоли, получивший марку ЗГВ-101М [17].

Перед специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, занимающимися исследованиями в области модельных композиций, была поставлена задача разработки новых составов, не уступающих по свойствам зарубежным. Работа предполагала подбор отечественных материалов (аналогов иностранным) на основе продуктов органического синтеза: синтетических восков, полимеров, полимерных смол и других олигомеров, с учетом актуальной номенклатуры продукции, выпускаемой предприятиями отечественной химической промышленности. В институте проводили разработку и изготовление экспериментальных составов модельных композиций, исследования основных физико-механических (предела прочности, линейной усадки) и физико-химических (массовой доли золы, температуры каплепадения, теплоустойчивости) свойств образцов.

Коллективу авторов: Оспенниковой О.Г., Рассохиной Л.И., Парфеновичу П.И., Китаевой Н.С., Ширякиной Ю.М., Пикулиной Л.В., под руководством академика РАН Е.Н. Каблова удалось разработать и в 2016 г. запатентовать модельную композицию нового поколения на основе отечественных материалов в рамках программы импортозамещения [18]. Проведенные в дальнейшем в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ исследования позволили дополнительно создать ряд марок модельных композиций типа ВИАМ.

Деятельность производственного участка по изготовлению модельных композиций в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ с середины 2010-х гг. функционирует производственный участок, находящийся в составе лаборатории, занимающейся технологиями литейных процессов жаропрочных сплавов. На участке выпускается широкий ассортимент модельных композиций двух типов: ВИАМ и Салют, из которых наиболее часто применяются марки ВИАМ МК-Л, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-4, Салют-1, Салют-3. Технологическое оснащение участка позволяет обеспечить объемы производства – порядка 60 тонн в год [19, 20].

Как упоминалось ранее, в процессе литья по выплавляемым моделям качество модельной композиции имеет важное значение при изготовлении моделей лопаток двигателей, различных фасонных и корпусных деталей сложной конфигурации и других ответственных изделий. Процесс производства модельных композиций в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ характеризуется непродолжительными сроками изготовления, невысокими ценами на готовую продукцию (особенно в сравнении с иностранными аналогами), а главное – импортнезависимостью, так как используются исходные материалы исключительно российского производства. Некоторые модели деталей представлены на рис. 1.

Специалисты, работающие на производственном участке, обладают богатым практическим опытом и высокими профессиональными компетенциями в данной области. Помещения, в которых проводятся работы по изготовлению модельных

композиций, оборудованы общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией, сама продукция не обладает никакими токсичными свойствами и не оказывает вредного воздействия на организм человека.

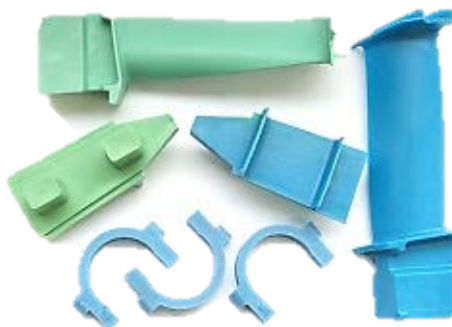


Рис. 1. Модели деталей газотурбинных двигателей из модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Названные факторы оказывают положительное влияние на обеспечение стабильности физико-механических и технологических свойств модельных композиций, что способствует получению наиболее качественных литых деталей. Кроме того, происходит постоянное совершенствование свойств модельных композиций, при необходимости оперативно осуществляется разработка новых составов по заданным параметрам.

Неоднократно производилось налаживание технологии изготовления восковых моделей лопаток турбины и соплового аппарата газотурбинных двигателей из модельных композиций типа ВИАМ на оборудовании промышленных предприятий машиностроительной отрасли. Экспериментальные партии восковых моделей обладали высоким уровнем свойств, а их опробование в производственных условиях дало положительные результаты.

Деятельность производственного участка по изготовлению модельных композиций заключается в следующих направлениях:

- выполнение большого объема хоздоговорных работ, в том числе в рамках Государственного оборонного заказа, в области изготовления и поставки на предприятия модельных композиций с оформлением соответствующей документации;
- анализ и подбор исходных материалов для оптимизации составов модельных композиций и повышения их физико-механических и технологических свойств;
- изготовление и испытание опытных образцов модельных композиций в рамках разработки новых составов в соответствии с требованиями потенциальных заказчиков;
- выполнение государственных контрактов на проведение научно-исследовательских работ в области совершенствования составов, свойств и оптимизации технологии производства модельных композиций;
- опробование разработанных модельных составов как во внутреннем производстве НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, так и в условиях сторонних промышленных предприятий;
- осуществление входного контроля исходных материалов и изготовленных модельных композиций;
- разработка технологических и производственных инструкций, технологических рекомендаций, технических условий на модельные композиции, обеспечение своевременного внесения в них изменений с целью соблюдения требований действующей нормативно-технической документации;

– разработка и проведение комплекса мероприятий, нацеленных на профилактику и предупреждение появления брака в производстве модельных композиций.

Исходные материалы, используемые для изготовления модельных композиций марок ВИАМ и Салют, должны соответствовать требованиям нормативной документации и сопровождаться документом о качестве (сертификатом или паспортом).

В соответствии с техническими условиями ТУ 1-595-1-1545–2015 «Композиции модельные» (с Изменением № 1) контролю подлежат как исходные материалы, так и партии изготовленной модельной композиции.

Контролируемые параметры исходных материалов (парафин, воск, смолы):

- температура каплепадения (для парафина и воска);
- теплоустойчивость (для парафина) – температура, при которой модельные композиции сохраняют способность противостоять деформации при нагреве под действием собственной массы; определяется как температура, при которой прогиб образца, установленного на опоры с расстоянием между ними 100 мм, достигает 2 мм (на рис. 2 представлен термостат для проведения данного испытания);
- температура размягчения (для воска и смол; прибор представлен на рис. 3);
- значение пенетрации (при нагрузке 200 г; используется специальный прибор, представленный на рис. 4), характеризующее глубину проникания иглы в образец на 0,1 мм при определенном режиме, т.е. степень твердости. Чем больше данный показатель при одних и тех же значениях температуры, нагрузки и длительности проникания, тем выше теплостойкость материала.



Рис. 2. Термостат для определения теплоустойчивости парафина



Рис. 3. Аппарат для определения температуры размягчения нефтепродуктов



Рис. 4. Прибор для определения пенетрации нефтепродуктов

Для подтверждения качества исходных материалов изготавливают технологическую пробу (10 кг) и проводят испытания на соответствие названным техническим условиям.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ входной контроль остальных компонентов для производства модельных композиций (наполнителей, поверхностно-активных веществ, антиоксидантов, термостабилизаторов и других добавок) осуществляется сверкой документов о качестве на соответствие нормативной документации.

При получении неудовлетворительных результатов испытаний по одному из контролируемых параметров проводятся повторные испытания вновь отобранной пробы из удвоенного количества мест той же партии. Результаты повторных испытаний являются окончательными и распространяются на всю партию материала. При получении неудовлетворительных результатов повторных испытаний данная партия исходных материалов бракуется и использованию не подлежит.

Каждая партия изготовленной модельной композиции проходит приемосдаточные испытания на определение предела прочности при статическом изгибе при температуре 20 ± 1 °С, МПа; теплоустойчивости; массовой доли золы; температуры каплепадения, условно отражающей температуру перехода из твердого состояния в вязкое (на рис. 5 представлена фотография аппарата типа «Капля»).

Для проведения испытаний из брикетов модельных композиций отбирают точечные пробы массой не менее 50 г каждая. Пробы перемешивают, расплавляют и замешивают до появления однородной пастообразной массы, затем отпрессовывают не менее 12 однородных образцов, не имеющих видимой усадки, раковин, вкраплений и механических повреждений.

На рис. 6 представлены фотографии моделей лопаток из современной модельной композиции.



Рис. 5. Аппарат для определения температуры каплепадения нефтепродуктов



Рис. 6. Модели лопаток газотурбинного двигателя

Исследования в области модельных композиций

Организации производственного участка по изготовлению модельных композиций в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ предшествовало проведение ряда научно-исследовательских работ, связанных с подбором составов, разработкой технологических процессов изготовления и применения модельных композиций, применительно к получению ответственных деталей авиационного назначения методом литья по выплавляемым моделям. Работы были обусловлены в первую очередь требованиями решения проблем импортозамещения, так как часто для изготовления рабочих и сопловых лопаток, а также деталей камеры сгорания газотурбинных двигателей в РФ применялись зарубежные модельные составы – в основном американского и европейского производства [5, 20]. Проведены анализ причин брака моделей при прессовании и классификация модельных композиций по составам [6], изучено влияние разных наполнителей на свойства модельных композиций [21], проведена оптимизация технологических параметров запрессовки моделей [22] и изучены реологические характеристики композиций [23, 24]. В исследованиях использовалось численное моделирование – методы математического планирования эксперимента [25–27]. Проводились также экспериментальные работы, связанные с изучением вопроса удаления модельных композиций [28] и применения технологического приема гранулирования для улучшения технологичности процесса изготовления модельных композиций [20].

Заключения

Метод литья по выплавляемым моделям позволяет получать из жаропрочных сплавов различные детали газотурбинных двигателей, а также фасонные и корпусные детали сложной конфигурации с высоким качеством поверхности и точностью размеров. Применяемые модельные композиции должны соответствовать требованиям технических условий на них и изготавливаться в строгом соответствии с технологической документацией, утвержденной в установленном порядке.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в середине 2010-х гг. был организован производственный участок по выпуску современных модельных композиций. Кроме того, проведен комплекс научно-исследовательских работ в области модельных композиций, предложена их классификация в зависимости от природы компонентов. Разработаны основные требования к модельным композициям, обеспечивающие получение качественных отливок деталей из жаропрочных никелевых сплавов. Установлено, что качество исходных компонентов имеет важное значение.

Результаты проведенных исследований в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ позволили выбрать оптимальные режимы изготовления моделей различной конфигурации и послужили основой для разработки технологических процессов изготовления модельных композиций типа ВИАМ.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской Академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Демонис И.М. Во все лопатки // Наука и жизнь. 2007. № 6. С. 40–44.
3. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
4. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Специальные технологии литья. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 368 с.
5. Оспенникова О.Г. Жаропрочные сплавы нового поколения и модельные композиции для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2016. № 3. С. 17–20.

6. Оспенникова О.Г., Асланян И.Р. Направления развития технологии изготовления модельных композиций для лопаток и других деталей ГТД // Литейное производство. 2018. № 3. С. 20–24.
7. 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.
8. Каблов Е.Н. Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации // Газотурбинные технологии. 2000. № 3. С. 10–13.
9. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
10. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
12. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М., Орехов Н.Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 60–70.
13. Братухин А.Г., Шалин Р.Е., Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Орехов Н.Г. Литые монокристалльные турбинные лопатки // Литейное производство. 1993. № 6. С. 3–6.
14. Асланян И.Р., Оспенникова О.Г. Современные тенденции развития технологии изготовления модельных композиций для литья жаропрочных сплавов // Сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» (9 ноября 2017 г., г. Москва). М.: ВИАМ, 2017. С. 49–58.
15. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций // Литейное производство. 2016. № 10. С. 26–28.
16. Репах С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
17. Гапанькова Е.И., Латышевич И.А. Модельные композиции для литья по выплавляемым моделям // Сб. материалов Пятого междисциплинарного науч. форума с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии» (30 октября – 1 ноября 2019 г., г. Москва): в 2 т. М.: НПП «ИСИС», 2019. Т. II. С. 100–102.
18. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2600468 Рос. Федерация; заявл. 20.03.15; опубл. 10.08.16.
19. Ечин А.Б., Дейнега Г.И., Нарский А.Р. Новые разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н., Мокеев Н.А. Гранулирование модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
21. 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.
22. 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.

23. Асланян И.Р., Гусева М.А., Оспенникова О.Г. Сравнительное исследование физико-механических и реологических характеристик модельных композиций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 6. С. 34–39.
24. Гусева М.А., Асланян И.Р. Влияние наполнителей на реологические характеристики модельных композиций для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
25. 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: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
26. Асланян И.Р., Еремкина М.С. Методология исследования модельных композиций для литья лопаток ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 8. С. 28–32.
27. Асланян И.Р., Рассохина Л.И., Оспенникова О.Г. Применение полного факторного эксперимента при разработке модельных композиций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 10. С. 20–26.
28. Каблов Е.Н., Демонис И.М., Деев В.В., Бондаренко О.А., Нарский А.Р. Технология удаления модельных масс из керамических форм для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2005. № 3. С. 12–14.

References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science: Results and Prospects. *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Demonis I.M. At Full Speed. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 6, pp. 40–44.
3. *Investment Casting*. Ed. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroyenie, 1984, 408 p.
4. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Special Casting Technologies*. Moscow: Publ. House of Bauman Moscow State Tech. Univ., 2010, 368 p.
5. Ospennikova O.G. Heat-resistant alloys of a new generation and model compositions for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 3, pp. 17–20.
6. Ospennikova O.G., Aslanyan I.R. Directions for the development of technology for the manufacture of model compositions for blades and other gas turbine engine parts. *Liteynoe proizvodstvo*, 2018, no. 3, pp. 20–24.
7. 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.
8. Kablov E.N. Production of turbine blades for gas turbine engines by directional crystallization. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2000, no. 3, pp. 10–13.
9. Kablov E.N. *Cast blades for gas turbine engines. Alloys, technologies, coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
10. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
12. Kablov E.N., Toloraia V.N., Demonis I.M., Orekhov N.G. Directional crystallization of heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 60–70.
13. Bratukhin A.G., Shalin R.E., Kablov E.N., Toloraia V.N., Orekhov N.G. Cast single-crystal turbine blades. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 6, pp. 3–6.
14. Aslanyan I.R., Ospennikova O.G. Modern trends in the development of technology for the manufacture of model compositions for casting heat-resistant alloys. *All-Rus. scientific-technical conf. «Fundamental and applied research in the field of creating heat-resistant nickel and intermetallic casting alloys and highly efficient technologies for manufacturing gas turbine engine parts»* (November 9, 2017, Moscow). Moscow: VIAM, 2017, pp. 49–58.

15. Ospennikova O.G. Thermophysical and rheological characteristics of synthetic resins for model compositions. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 10, pp. 26–28.
16. Repyakh S.I. *Technological foundations of investment casting*. Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p.
17. Gapankova E.I., Latyshevich I.A. Model compositions for investment casting. *Reports Fifth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation «New Materials and Advanced Technologies»* (October 30 – November 1, 2019, Moscow): in 2 vols. Moscow: NPP ISIS, 2019, vol. II, pp. 100–102.
18. *Composition for the manufacture of investment models*: pat. 2600468 Rus. Federation; appl. 20.03.15; publ. 10.08.16.
19. Echin A.B., Deynega G.I., Narsky A.R. New developments of NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in the field of materials for casting processes of superalloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N., Mokeev N.A. Granulation of model compositions produced by National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM for castings on smelted models. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
21. 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.
22. Ospennikova O.G. Research and working out of parametres 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.
23. Aslanyan I.R., Guseva M.A., Ospennikova O.G. Comparative study of physical, mechanical and rheological characteristics of model compositions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 6, pp. 34–39.
24. Guseva M.A., Aslanyan I.R. The effect of fillers on the rheology of model composition. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
25. 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: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
26. Aslanyan I.R., Eremkina M.S. Methodology for studying model compositions for casting gas turbine engine blades. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 8, pp. 28–32.
27. Aslanyan I.R., Rassokhina L.I., Ospennikova O.G. Application of a full factorial experiment in developing model compositions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 10, pp. 20–26.
28. Kablov E.N., Demonis I.M., Deev V.V., Bondarenko O.A., Narsky A.R. Technology for removing model masses from ceramic molds for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2005, no. 3, pp. 12–14.

Информация об авторах

Форостович Татьяна Леонидовна, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Мокеев Никита Александрович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Tatyana L. Forostovich, Head of Production Area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Nikita A. Mokeev, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.12.2024.
The article was submitted 28.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 09.12.2024.