
Научная статья

УДК 621.74

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12

УДАЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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

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

Аннотация. Детали газотурбинных двигателей изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов методом литья по выплавляемым моделям. Одним из наиболее ответственных технологических этапов этого процесса, во многом определяющим качество готовой отливки, является удаление модельных масс из оболочковых форм. Рассмотрены достоинства и недостатки разных способов удаления модельных составов, а также основные направления отечественных научно-исследовательских работ, нацеленных на интенсификацию процесса, уменьшение возможности образования трещин в формах и брака отливок.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки, жаропрочные сплавы, точное литье, модельные композиции, воск

Для цитирования: Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н. Удаление модельных композиций из оболочковых форм в производстве литых лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.

Scientific article

REMOVAL OF MODEL COMPOSITIONS FROM SHELL MOLDS IN THE PRODUCTION OF CAST GAS TURBINE ENGINE BLADES

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

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

Abstract. Gas turbine engine parts are made of nickel superalloys by die casting. One of the most important technological stages of this process, which largely determines the quality of the finished casting, is the removal of model masses from shell molds. The review examines the advantages and disadvantages of various methods of removing model compounds, as well as the main trends of domestic scientific research studies aimed at intensifying the process, reducing the possibility of cracks formation in molds and casting defects.

Keywords: gas turbine engine, blades, superalloys, precision casting, model compositions, wax

For citation: Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N. Removal of model compositions from shell molds in the production of cast gas turbine engine blades. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.

Введение

Статья посвящена технологическим достоинствам и недостаткам основных способов удаления модельных композиций в производстве ответственных деталей газотурбинных двигателей литьем по выплавляемым моделям. Технологии газотурбинного двигателестроения в нашей стране начали развиваться в 1930-х гг. и связаны с именем академика Академии наук СССР Архипа Михайловича Льюльки (1908–1984).

Газотурбинный двигатель представляет собой вал с размещенными на нем диском с вентиляторными лопатками нагнетателя и диском с лопатками турбины, между которыми расположена камера сгорания. В процессе работы двигателя сжатый нагнетателем воздух подается в камеру, куда также поступает керосин; газообразные продукты горения топлива создают поток раскаленных газов, который приводит во вращение диск турбины и создает реактивную тягу, что сопровождается выделением большого количества энергии [1].

Экстремальные условия эксплуатации газотурбинных двигателей сопряжены с воздействием на них в течение продолжительного времени как высоких температур, так и различных видов напряжений. Турбинные лопатки, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов, являются самыми термонапряженными деталями горячего тракта, так как на них воздействует максимальная нагрузка [2]. Совершенствование характеристик авиационных двигателей позволяет увеличить рабочие температуры газа, выходящего из камеры сгорания. Как следствие, повышение рабочей температуры газа на входе в турбину способствует росту экономических характеристик двигателя, снижает выбросы оксидов азота (IV) и углерода (IV), уменьшает уровень шума и расход топлива [3].

Первоначально лопатки для двигателей изготавливали методом штамповки из прутков жаропрочного сплава, после чего была необходима длительная и трудоемкая механическая обработка изделий на станках. Подобная технология была далеко не экономичной и приводила к образованию большого количества отходов металла в виде стружки [1]. Вместе с тем развивающаяся авиационная техника требовала создания двигателей с более высокими параметрами турбинных лопаток, работающих длительное время при высоких температурах газа [4]. Однако увеличение жаропрочности сплавов путем повышения содержания легирующих добавок тугоплавких металлов привело к столь высокой твердости сплава, что он перестал поддаваться формованию методами горячей деформации, поэтому было необходимо найти новые технические решения.

Производство литых турбинных лопаток для авиационных двигателей было организовано благодаря трудам академика Академии наук СССР (затем – Российской академии наук) Сергея Тимофеевича Кишкина (1906–2002). В 1950-х гг., работая во Всесоюзном научно-исследовательском институте авиационных материалов (в настоящее время – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ), он стал основоположником литейной технологии для получения высококачественных деталей горячего тракта из жаропрочных сплавов [5].

Литейная технология позволила получить лопатку требуемого профиля, со сложной геометрической формой внутренней полости и обеспечением необходимых значений точности и шероховатости поверхностей [6, 7]. Необходимость механической обработки при этом была сведена к минимуму, что стало эффективным решением проблемы повышения температурного порога применения лопаток авиационных двигателей. Первым генеральным конструктором, применившим литейный жаропрочный сплав в двигателе, был Николай Дмитриевич Кузнецов (1911–1995) [8].

Теория жаропрочности С.Т. Кишкина в совокупности с внедрением разработанных по его инициативе литейных жаропрочных никелевых сплавов и новой перспективной технологии литья лопаток стали основой разработки высокотемпературных двигателей и позволили сделать важный вклад в становление отечественной авиации.

С учетом того, что рабочая температура газа на входе в турбину значительно превышает температуру плавления жаропрочных сплавов, разработана технология изготовления охлаждаемых лопаток с использованием керамических стержней из оксида алюминия, которые затем удаляли фтористоводородной кислотой (HF). Для защиты лопаток от высокотемпературной газовой среды созданы специальные теплозащитные покрытия.

Учеными ВИАМ разработаны технологические процессы литья различных образцов и лопаток газовых турбин – сначала методом равноосного литья, затем направленной кристаллизацией и методом монокристаллического литья, создано специализированное высокоградиентное оборудование с автоматизированным управлением, разработаны составы огнеупорных литейных форм и стержней [9, 10].



Рис. 1. Отливки лопаток газотурбинного двигателя



Рис. 2. Керамическая оболочковая форма

До настоящего времени основной технологией изготовления лопаток турбин и других ответственных деталей газотурбинных двигателей (вид литых лопаток представлен на рис. 1) остается литье по выплавляемым моделям, называемое «точным» литьем. Сначала из модельного состава (чаще всего на основе воска) в пресс-формах изготавливают модель будущего изделия и литниково-питающей системы, внутри модели устанавливают керамический стержень для формирования охлаждающей полости и собирают модельные блоки. После приготовления суспензии, состоящей из связующего и смеси огнеупорных порошков, ее послойно наносят на модельный блок с обсыпкой шлифпорошком разной зернистости и сушкой каждого слоя при определенных условиях. Затем восковую модель удаляют, а полученную керамическую оболочковую форму направляют на высокотемпературный обжиг. Высокие физико-механические характеристики прокаленной керамической формы (пример которой представлен на рис. 2) позволяют ей выдерживать температуру расплавленного жаропрочного металла. После заливки сплавом в вакуумной установке происходит выбивка отливок из форм, отделение литников и прибылей от полученных отливок, затем стержни удаляют (обычно методом выщелачивания) [11–13].

Требования к технологическому процессу удаления модельных композиций

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при изготовлении деталей горячего тракта газотурбинных двигателей применяют модельные составы собственного производства, относящиеся к новому поколению композиций с улучшенными и стабильными технологическими характеристиками. С середины 2010-х гг. для решения задач по импортозамещению в институте налажен выпуск широкого ассортимента модельных

композиций двух типов: «ВИАМ» и «Салют», которые изготавливают на основе отечественных материалов высокого качества – продуктов органического синтеза [14–16].

Степень точности воспроизведения и стабильности размеров получаемых литых деталей зависят от многих параметров, таких как физико-механические характеристики применяемых модельных составов, точность соблюдения всех технологических операций изготовления оболочковой формы, и особенно – удаления модельного состава.

Рассмотрим требования к данной стадии процесса литья по выплавляемым моделям. Технологический режим удаления модельного состава должен обеспечивать полноту удаления, гарантировать сохранение прочностных свойств, чистоту поверхности и целостность оболочковых форм, качество отливки. Важное значение также имеет возможность осуществления многократного использования модельной массы и снижения затрат на ее регенерацию.

Основной проблемой, возникающей при удалении модельных составов, является возрастание растягивающих напряжений в стенках формы, что происходит из-за различия в коэффициентах линейного теплового расширения (КЛТР) материалов модели и керамической формы: при нагревании модельный состав расширяется быстрее, чем керамика. Поэтому первое и главное условие достижения качества удаления модельного состава – это необходимость максимально быстрой передачи тепла к поверхностному слою модели, что осуществляется путем повышения температуры теплоносителя. Формируемый высокий температурный градиент между поверхностью модели, прилегающей к форме, и ее центральной частью не позволяет внутренним слоям модели успеть прогреться. Оплавление массы с поверхности способствует аккуратному ее вытеканию. Иными словами, образующийся зазор между стенками оболочки и моделью компенсирует расширение основного объема модели при нагреве, сводя к минимуму возможность образования трещин [17, 18].

При проведении медленного нагрева формы модель успевает прогреться на всю толщину, а расширяясь, оказывает механическое давление на форму изнутри, что приводит к появлению трещин, которые могут развиваться при дальнейшем прокаливании. Попадание в них металла во время заливки приведет к дефектам на отливках или разрушению формы.

Способы удаления модельных композиций

Существуют различные способы удаления модельных составов, каждый из которых обладает как технологическими достоинствами, так и недостатками [11–13, 19, 20]. В качестве теплоносителя могут использоваться жидкие и газообразные вещества: перегретый водяной пар, горячая вода, модельный состав, полигликоли, высококипящие органические жидкости, горячий воздух. Удаление модельных составов также возможно посредством воздействия на оболочковую форму электромагнитным излучением сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона (или микроволнами, распространение которых происходит с частотой от 300 МГц до 300 ГГц). Кратко рассмотрим особенности названных вариантов удаления моделей.

Удаление (выплавление) в горячей воде. Температура каплепадения модельного состава ниже температуры горячей воды. При удалении он всплывает на ее поверхность в ванне. Применяемая вода имеет температуру ~95 °С, процесс занимает не более 15–20 мин, вероятность образования трещин – средняя, однако возможно ухудшение физико-механических свойств, качества поверхностного слоя оболочковой формы и возврата модельного состава, так как вода может взаимодействовать с отдельными его компонентами. Требуется сушка керамической формы после удаления. Способ непригоден в случае удаления модельных масс с температурой плавления >80 °С, а также при

применении некоторых видов связующих. На рис. 3 представлена установка (ванна) для удаления модельных масс в горячей воде [13]. В воду обычно добавляют небольшое количество ($\sim 0,1\%$ (по массе)) поверхностно-активных веществ, несущих две основные функции: предупреждение омыления модельного состава и защита ванны от разрушения.

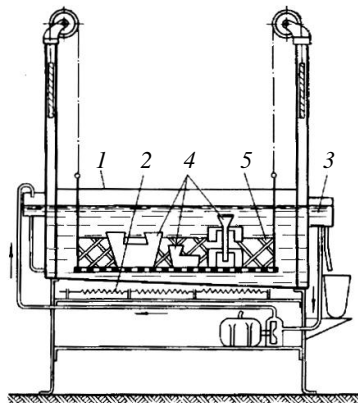


Рис. 3. Установка для удаления модельных составов в горячей воде: 1 – корпус; 2 – электрический нагреватель; 3 – сборник модельного состава; 4 – модельные блоки; 5 – корзина

Удаление в сухом воздухе. Способ, требующий достаточно длительной продолжительности процесса и повышенного энергорасхода, подходит для модельных составов с температурой плавления $>80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увлажнения формы не происходит. Имеется опасность с точки зрения трещинообразования или разрушения формы: скорость нагрева воздуха ниже, чем в случае применения других теплоносителей.

Удаление в перегретом модельном составе. Состав пропитывает форму, проникая в ее поры, повышая прочность в непрокаленном состоянии и выгорая при обжиге. Имеют место ухудшение условий труда и качества возврата.

Удаление в полигликолях. Процесс протекает при температурах, близких к $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Данные вещества могут растворяться в отдельных модельных составах, что приводит к изменению их свойств, пропитке стенок оболочки и увеличению расхода полигликоля.

Удаление в высококипящих органических жидкостях. Процесс характеризуется низким процентом брака по трещинам, но связан с токсичностью паров и взрывопожароопасностью, поэтому требует оснащения работающих специальными средствами защиты. Необходима более длительная прокалка для выжигания модельных масс в порах формы.

Во всех случаях при удалении модельных составов обязательно оборудование рабочих мест приточно-вытяжной вентиляцией с последующей очисткой воздуха, попадающего в атмосферу.

Удаление в СВЧ-поле (диэлектрический нагрев). В основе способа лежит явление нагрева любого диэлектрика (т. е. материалов модели и оболочковой формы) в электромагнитном поле за счет поляризации и протекания токов проводимости его заряженных частиц. Преобразование микроволн в тепло, происходящее сразу во всем объеме [21], позволяет достичь высокого качества поверхности форм, резкого уменьшения брака, близкого к 100%-ному возврату модельной массы. Дополнительной просушки керамики после удаления модели не требуется.

Главное требование к эксплуатации СВЧ-установок – необходимость предотвращения возможности утечки излучения из рабочей камеры, представляющего опасность для работы персонала [22]. Экспериментальное исследование, связанное с технологией

удаления модельных композиций из литейных форм данным способом, проводилось в ВИАМ в начале 2000-х гг. Лабораторная СВЧ-установка состояла из камеры периодического действия и двух источников электромагнитного излучения (магнетронных генераторов) с регулируемой выходной мощностью. Обеспечение равномерности обработки материала по объему изделия позволяло получить высокое качество форм с полным возвратом модельной композиции [17]. Недостаток способа – высокая стоимость оборудования. Применение СВЧ-энергии в технологических процессах различных отраслей науки и техники относится к наиболее экологически чистым и перспективным методам. Однако до настоящего времени все преимущества этой технологии еще не изучены и не реализованы [23].

Удаление перегретым паром в бойлерклаве. Способ заключается в резком нагреве и плавлении модельной массы с использованием перегретого водяного пара в качестве теплоносителя [24]. Высокая теплоемкость пара позволяет модели быстро оплавляться, что дает возможность получить низкий процент брака. Отметим, что модельные массы насыщаются паром, что затрудняет их регенерацию, а сложность оборудования, относящегося к опасным производственным объектам, ограничивает использование бойлерклава. Персоналу необходимо проходить в установленном порядке проверку знаний требований федеральных норм и правил в области промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под давлением. В целом способ технологичен и имеет высокую производительность.

Удаление растворением моделей в воде. Для растворения солевых модельных составов, из которых часто используется состав марки МОН-10К на основе мочевины (карбамида) и калиевой селитры (по массе: 90 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ + 10 % KNO_3), применяется ванна с водой комнатной температуры (20–25 °С), далее следует промывка форм проточной водой. Способ минимизирует вероятность трещинообразования, но применяется только в случае нерастворимых в воде материалов связующего и оболочковой формы. Солевые модельные массы обладают небольшой усадкой, теплоустойчивы, дешевы и содержат недефицитные компоненты. Для ускорения растворения существуют технологические приемы: создание каналов внутри моделей, что способствует увеличению площади соприкосновения с водой, а также введение добавок в состав модельной массы для улучшения растворения. К недостаткам, помимо хрупкости моделей, относится их гигроскопичность, требующая защиты поверхности блоков покрытием тонкой пленкой веществ, химически инертных по отношению к материалам керамической суспензии.

Удаление моделей выжиганием. Подходит при использовании дорогостоящих теплоустойчивых моделей на основе пенополистирола. Выжигание происходит одновременно с прокаливанием, что сопровождается выделением продуктов термического разложения полистирола. Возврата модельного состава в данном случае быть не может.

Исследования в области удаления модельных композиций

Современные научно-исследовательские работы в области удаления модельных составов в процессе литья по выплавляемым моделям имеют целью совершенствование данного технологического процесса. Этому способствуют следующие факторы: снижение вероятности трещинообразования посредством увеличения динамики удаления модельных масс, минимизация содержания остаточного материала в оболочковых формах после удаления модельных масс, снижение потерь модельных составов и затрат на их регенерацию, разработка рекомендаций для применения в массовом производстве деталей газотурбинных двигателей.

Российскими исследователями проводятся следующие основные работы в данном направлении: изучаются закономерности технологического процесса удаления

модельных масс, анализируются условия формирования внутренних напряжений и трещин, оцениваются основные факторы физико-механического воздействия моделей на оболочковую форму, оценивается напряженно-деформированное состояние при удалении модельных масс [19].

Разрабатывается комплекс мер по повышению эффективности выплавления масс в горячей воде в части контроля за степенью жесткости воды в ванне, так как содержание в ней так называемых солей жесткости (ионов кальция) может повлечь наличие в отливке неметаллических включений; делается акцент на регулировании степени кислотности (водородного показателя – рН) воды: предлагаются добавки соляной кислоты во избежание высокой щелочности среды, увеличивающей зольность неоднократно используемого модельного состава, и на подборе поверхностно-активного вещества в качестве меры по предотвращению омыления стеарина и коррозии материалов ванны [18, 25, 26].

Предлагаются некоторые технологические приемы по снижению трещин при удалении модельного состава [27].

Поднимаются вопросы модификации структуры оболочковых форм введением армирующих, теплоизолирующих и порообразующих добавок и изучения влияния теплофизических свойств керамики на длительность удаления модельных масс [28].

Разрабатываются методики расчета продолжительности полного выплавления моделей из оболочковых форм в зависимости от вида теплоносителя и температуры плавления модельной массы [29].

Проводятся экспериментальные исследования в области перспективных способов удаления моделей с помощью электромагнитного микроволнового излучения [30].

Заключения

Получение годных отливок лопаток и других деталей газотурбинных двигателей, имеющих стабильность геометрических размеров, высокий класс чистоты наружной поверхности пера лопатки и т. д., требует применения высококачественных оболочковых форм. Для их изготовления необходимы модельные составы с минимальными значениями усадки и КЛТР, рациональная конструкция литниково-питающей системы, эффективный режим удаления модельного состава. Широкое внедрение перспективных надежных способов удаления модельных составов, обеспечивающих интенсивность, полноту процесса удаления и возможность повторного использования, открывает возможности минимизации брака и повышения качества ответственных отливок из жаропрочных никелевых сплавов.

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

Список источников

1. Демонис И.М. Во все лопатки // Наука и жизнь. 2007. № 6. С. 40–44.
2. Коваленко Т.С. Дефект типа «пригар» на литых заготовках из жаропрочных никелевых сплавов (типа ЖС32) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). С. 14–22. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
3. 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). С. 30–41. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
4. Каблов Е.Н. С.Т. Кишкин и его вклад в развитие науки и материаловедения // Тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ, 2006. С. 5–11.

5. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 272 с.
6. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
7. Каблов Е.Н., Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. История развития технологии направленной кристаллизации и оборудования для литья лопаток газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 3–12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
8. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (к 100-летию со дня рождения). М.: Наука, 2006. 407 с.
9. Каблов Е.Н. Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации // Газотурбинные технологии. 2000. № 3. С. 10–13.
10. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
11. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
12. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Специальные технологии литья. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 368 с.
13. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
14. 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). С. 13–24. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
15. 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). С. 3–13. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-3-13.
16. 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). С. 3–11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
17. Нарский А.Р. Изготовление оболочковых форм с применением СВЧ энергии // Металлургия машиностроения. 2005. № 5. С. 40–44.
18. Леушина Л.И., Леушин И.О., Кошелев О.С. Повышение эффективности выплавления в горячей воде парафиностеариновых моделей точного литья // Черные металлы. 2019. № 10. С. 38–42.
19. Гаранин В.Ф., Озеров В.А., Муркина А.С., Куренкова О.А. Выплавление моделей из оболочковых форм // Литейное производство. 1997. № 2. С. 16–19.
20. Шуб И.Е., Сорокин П.В. Точное литье по выплавляемым моделям. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1968. 237 с.
21. Селиванов Ю.А. СВЧ-энергия в процессах формообразования ЛВМ // Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям: материалы семинара. М.: МДНТП, 1989. С. 91–97.
22. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2003. 344 с.
23. Семенов А.С., Байбурин В.Б. СВЧ-энергия и ее применение. Особенности, оборудование, технологические процессы. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1999. 116 с.
24. Углев Н.П., Пойлов В.З., Мерзляков К.С. и др. Об удалении модельных масс из керамических оболочек при литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2015. № 3. С. 17–20.
25. Леушин И.О., Леушина Л.И., Ракитин С.Р. Активация выплавления парафиностеариновых моделей точного литья в горячей воде // Прогрессивные литейные технологии: тр. XI Междунар. науч.-прак. конф. М., 2022. С. 103–108.

26. Способ изготовления керамических оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям: пат. 2707642 Рос. Федерация; заявл. 10.09.19; опубл. 28.11.19.
27. Сапченко И.Г., Евстигнеев А.И., Костина Т.В. Особенности удаления моделей из оболочковых форм в ЛВМ // Литейное производство. 1999. № 2. С. 35–36.
28. Сапченко И.Г., Евстигнеев А.И., Костина Т.В. Влияние теплопроводности оболочковых форм на удаление выплавляемых моделей // Литейное производство. 2000. № 3. С. 40–41.
29. Евстигнеев А.И., Дмитриевский И.П., Сапченко И.Г., Тимофеев Г.И. Исследование закономерностей процесса выплавления моделей из оболочковых форм // Литейное производство. 1994. № 3. С. 17–18.
30. Гутько Ю.И., Войтенко В.В., Медведчук С.А. Экспериментальные исследования выплавления восковых моделей из гипсовых литейных форм микроволновым излучением // Наука молодых – будущее России: сб. ст. VII Всерос. науч.-практ. конф. Пенза: Наука и просвещение, 2024. С. 67–70.

References

1. Demonis I.M. At full tilt. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 6, pp. 40–44.
2. Kovalenko T.S. «Burned» type defect on cast billets of heat-resistant nickel alloys (type ZhS32). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 14–22. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
3. 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), pp. 30–41. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
4. Kablov E.N. S.T. Kishkin and his contribution to the development of science and materials science. *Repors Intl. Sci.-tech. Conf. dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician S.T. Kishkina «Scientific ideas of S.T. Kishkin and modern materials science»*. Moscow: VIAM, 2006, pp. 5–11.
5. *Casting heat-resistant alloys. Effect of S.T. Kishkin: sci.-tech. collection*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2006, 272 p.
6. *History of aviation materials science. VIAM – 80 years: years and people*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
7. Kablov E.N., Echin A.B., Bondarenko Yu.A. History of development of directional crystallization technology and equipment for casting blades of gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), pp. 3–12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
8. Kishkin S.T. *Development, Research, and Application of Heat-Resistant Alloys: Selected Works (on the 100th Anniversary of His Birth)*. Moscow: Nauka, 2006, 407 p.
9. Kablov E.N. Production of Gas Turbine Engine Blades by Directional Solidification. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2000, no. 3, pp. 10–13.
10. Kablov E.N. *Cast Blades of Gas Turbine Engines. Alloys, Technologies, Coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
11. Repyakh S.I. *Technological Foundations of Investment Casting*. Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p.
12. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Special casting technologies*. Moscow: Publ. house of Bauman Moscow State Tech. Univ., 2010, 368 p.
13. *Investment casting*. Ed. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 408 p.
14. 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), pp. 13–24. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
15. 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), pp. 3–13. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-3-13.

16. 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), pp. 3–11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
17. Narskiy A.R. Shell Mold Manufacturing Using Microwave Energy. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2005, no. 5, pp. 40–44.
18. Leushina L.I., Leushin I.O., Koshelev O.S. Improving the Efficiency of Hot Water Melting of Paraffin-Stearin Precision Casting Patterns. *Chernye metally*, 2019, no. 10, pp. 38–42.
19. Garanin V.F., Ozerov V.A., Murkina A.S., Kurenkova O.A. Melting Patterns from Shell Molds. *Liteynoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 16–19.
20. Shub I.E., Sorokin P.V. *Precision Investment Casting*. 2nd ed., rev. and add. Leningrad: Mashinostroenie, 1968, 237 p.
21. Selivanov Yu.A. Microwave Energy in Investment Casting Processes. *Improving the Quality and Efficiency of Investment Casting: Seminar Proceedings*. Moscow: MDNTP, 1989, pp. 91–97.
22. Arkhangelsky Yu.S. *Dielectric Heating Units*. Microwave Units. Saratov: Publ. House of Saratov State Tech. Univ., 2003, 344 p.
23. Semenov A.S., Bayburin V.B. *Microwave Energy and Its Application. Features, Equipment, and Technological Processes*. Saratov: Publ. House of Saratov State Tech. Univ., 1999, 116 p.
24. Uglev N.P., Poilov V.Z., Merzlyakov K.S. et al. On the Removal of Pattern Masses from Ceramic Shells in Investment Casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2015, no. 3, pp. 17–20.
25. Leushin I.O., Leushina L.I., Rakitin S.R. Activation of Melting of Paraffin-Stearin Precision Casting Patterns in Hot Water. *Progressive Foundry Technologies: Proceedings of the XI Int. Res. and Pract. Conf. Moscow, 2022*, pp. 103–108.
26. *Method for Manufacturing Ceramic Shell Molds for Investment Casting*: pat. 2707642 Rus. Federation; appl. 10.09.19; publ. 28.11.19.
27. Sapchenko I.G., Evstigneev A.I., Kostina T.V. Features of Removing Patterns from Shell Molds in Investment Casting Machines. *Liteynoe proizvodstvo*, 1999, no. 2, pp. 35–36.
28. Sapchenko I.G., Evstigneev A.I., Kostina T.V. Effect of Thermal Conductivity of Shell Molds on the Removal of Investment Patterns. *Liteynoe proizvodstvo*, 2000, no. 3, pp. 40–41.
29. Evstigneev A.I., Dmitrevsky I.P., Sapchenko I.G., Timofeev G.I. Study of the regularities of the process of melting models from shell molds. *Liteynoe proizvodstvo*, 1994, no. 3, pp. 17–18.
30. Gutko Yu.I., Voitenko V.V., Medvedchuk S.A. Experimental studies of melting wax models from plaster casting molds using microwave radiation. *Science of the Young – the Future of Russia: Reports VII All-Rus. Sci. and Pract. Conf. Penza: Science and Education, 2024*, pp. 67–70.

Информация об авторах

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

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

Битюцкая Ольга Николаевна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 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

Статья поступила в редакцию 28.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.06.2025.
The article was submitted 28.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.06.2025