
Научная статья

УДК 621.74

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-3-10

УДАЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОЙЛЕРКЛАВА

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. Ответственные детали газотурбинных двигателей изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов методом точного (прецизионного) литья, называемого также литьем по выплавляемым моделям. Удаление модельных композиций из оболочковых форм – важнейшая стадия данного технологического процесса, в значительной степени определяющая качество готовой отливки. Рассмотрены особенности широко применяемого в отечественной промышленности современного способа удаления воскообразных модельных составов – в среде перегретого водяного пара с использованием бойлерклава.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки, жаропрочные сплавы, точное литье, воскообразные модельные композиции, оболочковые формы, бойлерклав

Для цитирования: Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н. Удаление модельных композиций из оболочковых форм с использованием бойлерклава // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 3–10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-3-10.

Scientific article

REMOVAL OF MODEL COMPOSITIONS FROM SHELL MOLDS USING A BOILER AUTOCLAVE

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. Responsible parts of gas-turbine engines are made of nickel superalloys by the method of precise (precision) casting, also called investment casting. Removal of model compositions from shell molds is the most important stage of this technological process, which largely determines the quality of the finished casting. The article examines the features of the modern method of removing waxy model compositions, which is widely used in the domestic industry, using a boiler-autoclave in a medium of superheated water vapor.

Keywords: gas turbine engine, blades, superalloys, precision casting, waxy model compositions, casting molds, boiler room

For citation: Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N. Removal of model compositions from shell molds using a boiler autoclave. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 3–10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-3-10.

Введение

Рабочие лопатки, изготавливаемые из жаропрочных сплавов на основе никеля, – это наиболее ответственные элементы газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. Они принимают на себя поток раскаленных газов, испытывая при этом

в течение длительного времени воздействие агрессивной коррозионной среды, возникающей как следствие образования продуктов сгорания топлива. Работа лопаток также связана со статическими и динамическими напряжениями растяжения, знакопеременными, термическими и иными нагрузками [1–3].

Температура газа на входе в турбину намного превышает температуру плавления сплава, из которого изготавливают лопатки. Работоспособность лопаток, определяющая мощность самого двигателя, достигается большей частью за счет системы их транспирационного (или проникающего) охлаждения и комплекса теплозащитных покрытий, что позволяет эффективно повышать температуру газа перед турбиной до высоких значений [1, 2, 4, 5]. Кроме того, приблизительно 1/3 прироста температуры обеспечивают такие факторы, как улучшение служебных характеристик жаропрочных сплавов, достигаемое за счет их легирования, а также оптимизация процессов металлургии (выплавки сплавов) и внедрение монокристаллического литья [4].

Изначально, на рубеже 1940–1950-х гг. во Всесоюзном научно-исследовательском институте авиационных материалов под научным руководством академика С.Т. Кишкина было найдено решение проблемы повышения температурного порога применения рабочих лопаток, когда удалось организовать производство деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных литейных сплавов [1, 2, 6]. Тогда появились новые марки сплавов (ЖСЗ, ЖС6, ЖС6К) и разработано специальное литейное оборудование. Технология литья по выплавляемым моделям, которая также называется прецизионным (от французского *précision* – точность) или точным литьем, применяющаяся и в настоящее время, позволила обеспечить следующие преимущества: получение идеального качества поверхности и высокой точности размеров отливок, причем любой геометрически сложной формы. Если ранее технологию точного литья использовали в основном при производстве художественных изделий, то для деталей газотурбинных двигателей различных конструкций точное литье оказалось единственно возможным способом получения.

Отметим, что в турбинах современных газотурбинных двигателей практически полностью отсутствуют рабочие неохлаждаемые лопатки, изготовленные методом горячей объемной штамповки из заготовок [7].

Требования к процессу удаления модельных композиций

Один из самых важных этапов прецизионного литья – это удаление модельных композиций из керамических оболочковых форм. От качества проведения данной технологической операции зависит как наличие дефектов в виде шероховатостей и трещин керамической формы (а значит, и дефектов готовой литой детали), так и чистота ее поверхности. По этой причине требуется обеспечить сохранение прочностных свойств и целостности огнеупорной оболочки, а также максимально возможную полноту удаления модельного состава. Оставшуюся в форме модельную массу, как правило, выжигают во время прокаливании керамики, однако при наличии внутренних труднодоступных полостей будет существовать опасность их загрязнения остаточным углеродом, что может повлечь за собой образование литейных дефектов и привести к браку готовой детали.

Непосредственно процесс выплавления (или вытапливания) модельного состава обычно происходит в результате контакта модельного блока с внешней теплоносящей средой. Существует ряд способов удаления модельных композиций из оболочковых форм. Наиболее часто используются следующие теплоносители: горячая вода, горячий воздух, расплав модельного состава, высококипящие органические жидкости типа глицерина, перегретый водяной пар [8–13]. Данные варианты удаления различаются температурой и продолжительностью процесса, вероятностью образования трещин на огнеупорной форме, возможным количеством остаточного материала модели.

Еще один известный и перспективный способ заключается в возможности генерации тепла непосредственно в форме и представляет собой так называемый диэлектрический

нагрев, а именно – воздействие на форму микроволновым электромагнитным излучением сверхвысокочастотного диапазона [8, 14–18].

Коэффициент литейного теплового расширения воскообразного модельного состава значительно превышает подобный коэффициент для керамики, поэтому при нагреве возрастает воздействие расширяющейся модели на оболочковую форму. Медленное повышение температуры при этом недопустимо, поскольку оно приводит к равномерному прогреву модели и ее расширению одновременно по всему объему. Возникающие напряжения могут превысить предел прочности керамики, в результате чего на форме образуются трещины и возможно даже ее разрушение.

Поэтому важно обратить внимание на то, что применение резкого нагрева – это основной технологический прием против возникновения трещин. Величина напряжений значительно уменьшается как только происходит подплавление пограничного слоя модельного состава. Он начинает вытекать из полости формы, что сопровождается образованием зазора между оболочковой формой и поверхностью модели.

Особенности применения бойлерклава для удаления модельных композиций

В настоящее время современным, эффективным и часто используемым на предприятиях способом удаления воскообразных модельных композиций из оболочковых форм является применение в качестве теплоносителя перегретого водяного пара под высоким давлением. Подобная технология заключается в крайне быстром нагреве с использованием специального оборудования (бойлерклава) и оплавлении тонкого внешнего слоя восковой модели, граничащего с огнеупорной формой. Расплавившись, поверхностный слой модельной композиции вытекает из полости формы, исключая механическую нагрузку на ее стенки [11]. Данный способ отличается технологичностью, безопасностью, рациональностью, высокой производительностью, качеством получаемой продукции.

Чаще всего на отечественных предприятиях используются бойлерклавы производства следующих стран: Великобритании, Италии, Китая, а ранее – производства СССР (г. Тирасполь, Тираспольский завод литейных машин им. С.М. Кирова).

На рис. 1 [10] представлена схема, а на рис. 2 – фотографии бойлерклава.

Конструкция бойлерклава представляет собой изготовленный из стали горизонтальный сварной аппарат типа «сосуд в сосуде», состоящий из двух соединенных трубопроводом рабочих пространств: бойлера, называемого также парогенератором, и автоклава. Рабочая камера автоклава размещена внутри бойлера. В камере бойлера находится вода, контактирующая с электрическими нагревательными элементами. Она поддерживает высокую температуру, создавая эффект так называемой «нагревательной рубашки». Вследствие этого генерируется пар, поступающий за счет перепада давления в автоклав. На трубопроводе, соединяющем бойлер и автоклав, обычно устанавливают шаровой кран. В конструкцию бойлерклава входят также водяной насос, арматура, предохранительные устройства и контрольно-измерительные приборы. В современных бойлерклавах внешние поверхности камер имеют многослойную теплоизоляцию.

Процесс выплавления модельного состава в бойлерклаве состоит из следующих технологических операций: включение бойлерклава; задание необходимых технологических параметров (давление и продолжительность выдержки); выработка пара по заданным параметрам; открытие двери бойлерклава; установка и загрузка готовящихся к удалению моделей керамических форм в рабочую камеру; закрытие двери камеры; напуск пара в рабочую камеру, расплавляющего модельную композицию; выдержка блоков в камере; сброс давления и выпуск пара; открытие двери при атмосферном давлении внутри камеры; разгрузка и выключение бойлерклава. Расплавленный модельный состав удаляется в специальную емкость для его сбора.

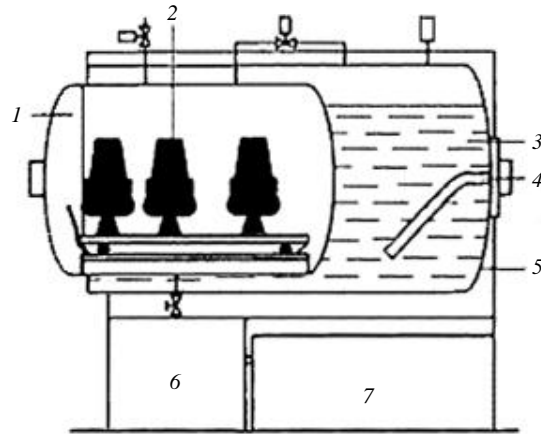


Рис. 1. Принципиальная схема бойлерклава для удаления модельных композиций: 1 – рабочая камера; 2 – керамическая форма; 3 – вода; 4 – электрический нагреватель; 5 – бойлер; 6 – разделитель воды и модельной композиции; 7 – емкость для сбора модельной композиции

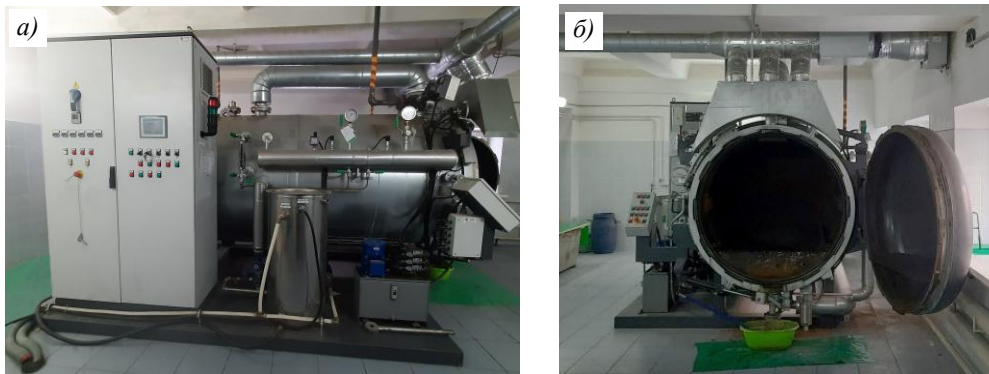


Рис. 2. Бойлерклав для удаления модельных композиций: а – вид сбоку; б – вид спереди

В процессе выплавления моделей в рабочей камере автоклава температура перегретого пара может повышаться до 200 °С, а крайне быстрое оплавление модели происходит ввиду высокой теплоемкости пара. Трещины в оболочковой форме не успевают образовываться, так как модельная композиция не успевает расширяться в результате нагревания.

Продолжительность цикла удаления модельного состава занимает не более 50 мин, производительность процесса зависит от объема рабочей камеры и может составлять несколько сотен килограммов в час. К достоинствам применяемого оборудования можно отнести повышенный ресурс сосуда, рассчитанный на десятки тысяч циклов, и срок службы – не менее 20 лет.

В соответствии с нормами международных стандартов контроль безопасности работы обеспечивается функционирующими надежными системами защиты и блокировки. Так, в отсек для форм невозможно подать пар, пока дверь не будет надежно закрыта, а также нельзя открыть дверь до сброса давления пара в рабочей камере. Бойлерклав снабжен предохранительным клапаном от повышения давления внутри аппарата выше допустимого значения, в случае его превышения срабатывает звуковая сигнализация. Бойлерклав должен быть заземлен, а у пульта управления необходимо разместить диэлектрический коврик.

Помимо перечисленных достоинств, применение бойлерклава имеет и некоторые недостатки:

- насыщение паром модельных композиций ухудшает их свойства, и для повторного использования требуется проведение регенерации;
- высокие капитальные затраты, связанные со стоимостью оборудования;

– применение бойлерклава недопустимо для вытапливания солевых модельных композиций, содержащих карбамид $\text{Co}(\text{NH}_2)_2$, так как выделяющийся аммиак может оказать негативное влияние на детали из меди и ее сплавов в случае их наличия [10]. На некоторых предприятиях существует практика использования водорастворимых, теплоустойчивых модельных композиций (например, МОН-10К, МПВС-2), которые имеют низкую усадку, обладают высокой текучестью в расплавленном виде и дают возможность получать сложные модели свободной заливкой.

В работе важно учитывать, что эксплуатация бойлерклава подразумевает соблюдение ряда определенных норм и правил в области промышленной безопасности Федеральной службы по экологическому и атомному надзору (Ростехнадзора) при использовании оборудования, работающего под давлением.

Основные меры безопасности при эксплуатации бойлерклава для удаления модельных композиций

К персоналу, допущенному для обслуживания бойлерклава, предъявляется ряд требований: возраст сотрудника – не моложе 18 лет; прохождение первичного и повторного инструктажей по охране труда и промышленной безопасности при работе с сосудами, работающими под давлением, – не реже одного раза в 3 мес.; отсутствие медицинских противопоказаний; производственное обучение безопасным приемам и методам работы и регулярная специальная аттестация. Работники должны иметь выданное в установленном порядке удостоверение на право работы с сосудом, а также должны быть обеспечены сертифицированными средствами индивидуальной защиты: хлопчатобумажными халатами, резиновыми и теплозащитными перчатками, противогазоаэрозольными респираторами и защитными очками.

Перед началом работы проверяется работа вентиляции; проводится осмотр оборудования на предмет отсутствия неплотностей, деформаций и повреждений отдельных элементов оборудования; проверяется работа манометров и предохранительных клапанов, исправность блокировочных устройств, арматуры и защитного заземления, наличие средств пожаротушения и аптечки первой помощи. Во время работы шум должен быть ровный без стуков и ударов, не свойственных нормальной работе.

Бойлерклав должен быть оснащен приточно-вытяжной вентиляцией, а помещение, в котором он установлен, – местной вытяжной вентиляцией в виде зонта.

В сменном журнале требуется фиксировать каждый цикл работы оборудования с указанием технологических параметров, производить записи о сдаче и приемке смены, отмечать замеченные отклонения и неисправности, фиксировать нарушения режима и прочее. После выработки бойлерклавом гарантированного числа циклов нагружения он должен подвергаться испытаниям на техническое освидетельствование и профилактическим работам.

Применение бойлерклава для удаления модельных композиций в литейном производстве отечественных машиностроительных предприятий

В настоящее время технология вытапливания модельных композиций с помощью бойлерклава находит широкое применение в литейном производстве ведущих машиностроительных предприятий Российской Федерации. Приведем несколько примеров.

В 2023 г. одной из отечественных компаний организовано импортозамещающее высокотехнологичное производство лопаток горячего тракта газовых турбин большой мощности. Литейный комплекс оснащен уникальным современным технологическим промышленным оборудованием и нацелен на решение проблем импортозамещения в производстве лопаток энергетических турбин большой мощности. В технологическую цепочку производства лопаток турбин входит бойлерклав, где под действием высоких значений температуры и давления пара модельная масса расплавляется, при этом ее остатки устраняются из форм в предварительной прокалочной печи [19].

Бойлерклав зарубежного производства также применяется на запущенном в 2017 г. участке литья по выплавляемым моделям одного из известных российских предприятий, разрабатывающих и производящих газотурбинные двигатели и многофункциональные газотурбинные энергоагрегаты, в том числе для силовых установок. Производство литых деталей на этом предприятии базируется исключительно на высококачественных материалах и технологиях [20].

В практике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при изготовлении литых деталей газотурбинных двигателей используются современные модельные композиции нового поколения на основе отечественных сырьевых материалов. Они обладают комплексом улучшенных и стабильных свойств, обеспечивают импортнезависимость и высокую технологическую безопасность [21]. Основным способом выплавления данных композиций также является применение сосуда, работающего под давлением, – бойлерклава.

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

Заключения

Приведенные в данном обзоре особенности способа удаления модельных композиций из литейных оболочковых форм с помощью бойлерклава в производстве ответственных деталей газотурбинных двигателей подтверждают его целесообразность, так как способ подходит для изготовления лопаток различной геометрической конфигурации.

Удаление модельных масс из керамических форм перегретым водяным паром под высоким давлением происходит с минимальными затратами времени и материалов, помогает исключить образование трещин в оболочковых формах, позволяет минимизировать брак, обеспечивает высокое качество форм и отливок. Способ отлично зарекомендовал себя благодаря высоким технологичности, производительности и эффективности. Это подтверждается в том числе опытом ряда отечественных современных промышленных предприятий, занимающихся производством литых лопаток для авиационных и энергетических газовых турбин большой мощности.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Демонис И.М. Во все лопатки // Наука и жизнь. 2007. № 6. С. 40–44.
3. 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: 14.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
4. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Демонис И.М., Фоломейкин Ю.И. Монокристаллические лопатки с транспирационным охлаждением для высокотемпературных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2003. № 1. С. 24–33.
5. 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: 14.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
6. 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.
7. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство газотурбинных двигателей / под ред. В.В. Крымова. М.: Машиностроение; Машиностроение-Полет, 2002. 376 с.
8. Гаранин В.Ф., Озеров В.А., Муркина А.С., Куренкова О.А. Выплавление моделей из оболочковых форм // Литейное производство. 1997. № 2. С. 16–19.
9. Леушина Л.И., Леушин И.О., Кошелев О.С. Повышение эффективности выплавления в горячей воде парафинистеариновых моделей точного литья // Черные металлы. 2019. № 10. С. 38–42.

10. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
11. 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.
12. 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> (дата обращения: 24.02.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.
13. Литье по выплавляемым моделям / под общ ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
14. Гутько Ю.И., Войтенко В.В., Медведчук С.А. Экспериментальные исследования выплавления восковых моделей из гипсовых литейных форм микроволновым излучением // Сб. VII Всерос. науч.-практич. конф. «Наука молодых – будущее России». Пенза: Наука и просвещение, 2024. С. 67–70.
15. Способ СВЧ-термообработки керамических литейных форм: пат. 2312733 Рос. Федерация; заявл. 03.03.05; опубл. 20.12.07.
16. Озеров В.А., Гаранин В.Ф., Муркина А.С. Выплавление модельных составов с использованием энергии сверхвысокочастотного нагрева // Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям: материалы семинара. М.: МДНТП, 1986. С. 108–110.
17. Каблов Е.Н., Демонис И.М., Деев В.В., Бондаренко Ю.А., Нарский А.Р. Технология удаления модельных масс из керамических форм для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2005. № 3. С. 12–14.
18. Захватов Ю.К., Рева И.Л., Подымов А.Н. Удаление модельных масс из керамических форм в поле токов высокой частоты // Авиационные материалы. М.: ОНТИ, 1981. Вып. 6: Прогрессивные процессы литья охлаждаемых лопаток. С. 76–80.
19. Смирнов А.А. Первое в России высокотехнологичное производство литых лопаток энергетических газовых турбин большой мощности // Газотурбинные технологии. 2023. № 5 (194). С. 2–7.
20. Петров А.Ю., Трубкина С.Н., Гилев В.И., Вертюх С.С., Овчинников М.В. Универсальные кремнезольные связующие материалы на водной основе // Литейщик России. 2018. № 6. С. 9–13.
21. 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: 14.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.

References

1. Kablov E.N. *Cast Blades of Gas Turbine Engines. Alloys, Technologies, Coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
2. Demonis I.M. In *All Blades*. *Nauka i Zhizn*, 2007, no. 6, pp. 40–44.
3. 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: August 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
4. Kablov E.N., Svetlov I.L., Demonis I.M., Folomeikin Yu.I. Single-crystal blades with transpiration cooling for high-temperature gas turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2003, no. 1, pp. 24–33.
5. 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: August 14, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
6. Kablov E.N. S.T. Kishkin and his contribution to the development of science and materials science. *Proceedings of the Int. scientific and technical conf. dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician S.T. Kishkin «Scientific ideas of S.T. Kishkin and modern materials science»*. Moscow: VIAM, 2006, pp. 5–11.

7. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. *Production of gas turbine engines*. Ed. V.V. Krymov. Moscow: Mashinostroenie; Mashinostroenie-Polet, 2002, 376 p.
8. Garanin V.F., Ozerov V.A., Murkina A.S., Kurenkova O.A. Melting of models from shell molds. *Liteynoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 16–19.
9. 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.
10. Repyakh S.I. *Technological Fundamentals of Investment Casting*. Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p.
11. 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.
12. 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> (accessed: February 24, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.
13. *Investment Casting*. Eds. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 408 p.
14. Gutko Yu.I., Voitenko V.V., Medvedchuk S.A. Experimental Studies of Melting Wax Models from Plaster Casting Molds by Microwave Radiation. *Proc. 7th All-Russian Scientific and Practical Conf. «Science of the Young – the Future of Russia»*. Penza: Science and Education, 2024, pp. 67–70.
15. *Method of Microwave Heat Treatment of Ceramic Casting Molds*: pat. 2312733 Rus. Federation; appl. 03.03.05; publ. 20.12.07.
16. Ozerov V.A., Garanin V.F., Murkina A.S. Melting of pattern compositions using the energy of microwave heating. *Improving the quality and efficiency of investment casting: seminar materials*. Moscow: MDNTP, 1986, pp. 108–110.
17. Kablov E.N., Demonis I.M., Deev V.V., Bondarenko Yu.A., Narsky A.R. Technology of removing pattern masses from ceramic molds for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2005, no. 3, pp. 12–14.
18. Zakhvatov Yu.K., Reva I.L., Podymov A.N. Removal of pattern masses from ceramic molds in a high-frequency current field. *Aviatsionnye materialy*. Moscow: ONTI, 1981, is. 6: Advanced Casting Processes for Cooled Blades, pp. 76–80.
19. Smirnov A.A. Russia's First High-Tech Production of Cast Blades for High-Power Gas Turbines. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2023, no. 5 (194), pp. 2–7.
20. Petrov A.Yu., Trubkina S.N., Gilev V.I., Vertyukh S.S., Ovchinnikov M.V. Universal Water-Based Silica-Ash Binders. *Liteyshchik Rossii*, 2018, no. 6, pp. 9–13.
21. 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: August 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.

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 the Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.10.2025.
The article was submitted 23.09.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.10.2025