
Обзорная статья

УДК 621.74

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-41-50

ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПРИ УДАЛЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛИТЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ Часть 1

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. Удаление модельных масс из керамических оболочковых форм – это одна из сложных технологических операций при изготовлении деталей газотурбинных двигателей методом литья по выплавляемым моделям. Рассмотрены возможности применения диэлектрического (микроволнового) нагрева как перспективного способа удаления модельных композиций. В первой части рассмотрены особенности поведения материала, не проводящего электрический ток и помещенного в электромагнитное поле. Приведены требования к конструкциям установок диэлектрического нагрева, а также названы основные области их использования.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, лопатки, жаропрочные сплавы, оболочковые формы, точное литье, модельные композиции, электромагнитное излучение, микроволны

Для цитирования: Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н. Применение диэлектрического нагрева при удалении модельных композиций из оболочковых форм в производстве литых лопаток газотурбинных двигателей. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 41–50. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-41-50.

Review article

APPLICATION OF DIELECTRIC HEATING IN THE REMOVAL OF MODEL COMPOSITIONS FROM SHELL MOLDS IN THE PRODUCTION OF CAST BLADES FOR GAS TURBINE ENGINES Part 1

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. Removal of model masses from ceramic shell molds is one of the complex technological operations in the manufacture of gas turbine engine parts by the method of investment casting. This review considers the possibilities of using dielectric (microwave) heating as a promising method for removing model compositions. In the first part, the article considers the features of the behavior of a material that does not conduct electric current and is placed in an electromagnetic field. Also the requirements for the designs of dielectric heating units are given, and the main areas of their use are listed.

Keywords: gas turbine engine, blades, superalloys, shell molds, precision casting, model compositions, electromagnetic radiation, microwaves

For citation: Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N. Application of dielectric heating in the removal of model compositions from shell molds in the production of cast blades for gas turbine engines. Part 1. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 41–50. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-41-50.

Введение

Литье по выплавляемым моделям, называемое иначе точным литьем, – это один из старейших методов получения различных металлических изделий любой конфигурации практически из любого сплава. По сравнению с такими методами обработки металла, как штамповка, прокат и ковка, литье по выплавляемым моделям обеспечивает существенные преимущества: повышенную точность геометрических размеров готовой литой детали, возможность получения сложных внутренних полостей изделия (например, предназначенных для лопаток газового тракта газотурбинных двигателей), отсутствие необходимости механической доработки и более низкую итоговую стоимость продукции [1–3].

Более того, ряд изделий высокого качества невозможно изготовить иным методом, кроме как точным литьем, который является уникальным для единичного и массового производства рабочих и сопловых лопаток и других ответственных деталей турбин газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. Лопатки, изготавливаемые из жаропрочных никелевых сплавов, испытывают целый комплекс напряжений статического (вызывающего деформации растяжения, изгиба и кручения), динамического (включая знакопеременные) и термического (напряжения растяжения, сжатия и другие нагрузки, обусловленные неравномерностью температурного поля) характера [4–6]. Необходимые работоспособность и долговечность лопаток обеспечиваются благодаря специальной системе воздушного охлаждения и нанесения теплозащитных покрытий [7, 8].

Технология изготовления литых лопаток газотурбинных двигателей получила распространение в середине XX в., ее перспективы были открыты академиком С.Т. Кишкиным (1906–2002) – знаменитым ученым, внесшим значительный вклад в развитие авиационного материаловедения [9–12]. В литейном производстве лопаток по выплавляемым моделям технологическая операция удаления модельной композиции из керамических оболочковых форм оказывает существенное влияние на качество готовых отливок.

Требования к проведению технологической операции удаления модельной композиции

Выплавленные модели (в сравнении с растворимыми и выжигаемыми), получившие наибольшее применение в технологии литейного производства, удаляют после послойного нанесения на модельный блок огнеупорного покрытия и его просушки.

Непосредственно процесс выплавки модельной массы должен обеспечивать выполнение следующих требований:

- максимально возможная полнота удаления;
- высокая точность воспроизведения модели и качества поверхности керамической формы;
- сохранение прочностных свойств и целостности формы;
- возможность повторного (неоднократного) использования модельного состава, снижение затрат на его регенерацию.

Обычно технология удаления модели подразумевает нагрев теплоносителя, что сопровождается напряженно-деформированным состоянием литейной формы: температурное

расширение модельной композиции намного превышает расширение керамики, поэтому растягивающие напряжения создают опасность зарождения и дальнейшего развития трещин и могут привести к дефектам отливок. Отметим, что крайне важна интенсификация передачи тепла к выплавляемой модели, формирующая высокий температурный градиент между поверхностью и центральной ее частью. Быстрый нагрев выплавляемого модельного состава приводит к его поверхностному оплавлению и минимизирует величину напряжений в форме [13].

Способы удаления модельных композиций

Способы удаления модельных составов различаются видом применяемого теплоносителя, температурой и продолжительностью проведения процесса и обладают определенными технологическими достоинствами и недостатками [1, 2, 11, 13–15]. В целом использование нагреваемого теплоносителя часто приводит к снижению качества возврата модельного состава, а в ряде случаев вызывает необходимость дополнительной сушки оболочковой формы перед прокалкой в течение нескольких часов.

Наибольшее распространение получила технология погружения форм в ванну с горячей водой.

Использование горячего воздуха представляет большую опасность из-за трещинообразования, поскольку скорость нагрева воздуха меньше, чем других теплоносителей.

Один из эффективных способов удаления моделей – применение перегретого водяного пара в бойлерклаве, который заключается в быстром нагреве и плавлении внешнего слоя модели [16]. Данный способ резко сокращает брак керамических форм [17], но усложняет технологию, связанную как с проблемой насыщения моделей паром, затрудняющей последующую возможность их повторного использования, так и со строгими требованиями соблюдения правил и норм в области промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под давлением [18]. Необходимо также учесть высокую стоимость приобретения бойлерклава.

К принципиально иным способам удаления выплавляемых моделей можно отнести применение диэлектрического нагрева, называемого в зарубежной научно-технической литературе микроволновым. Он заключается в возможности генерации тепла непосредственно в объеме материала и представляет собой воздействие на диэлектрик (в рассматриваемом случае – литейную форму и модельную композицию) электромагнитным излучением сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона (ранее в некоторых случаях – высокочастотного). Диэлектрики обладают некоторой проводимостью в электромагнитном поле, поляризуются, при этом внутримолекулярные заряды начинают смещаться, затрачивая работу против сил межмолекулярного взаимодействия, которая вызывает нагрев. Волна проникает вглубь объекта, происходит объемное и равномерное преобразование энергии электромагнитных колебаний в тепло [15, 19–25]. Отсутствие теплоносителя дает также безынерционность регулирования обработки материала, что приводит к улучшению его качества [26].

Особенности электромагнитного поля и поведения помещенного в него диэлектрика

Рассмотрим подробнее понятие электромагнитного поля и определим факторы, влияющие на величину выделения тепла помещенным в названное поле диэлектриком.

Электромагнитное поле – это взаимосвязанные переменные электрическое и магнитное поля, т. е. особая форма материи, создаваемая заряженными частицами

и обладающая электромагнитной энергией. Электромагнитное излучение (или электромагнитная энергия) – это распространение электромагнитных волн от точки к точке пространства от определенного источника (генератора).

Как известно, существование электромагнитных волн предсказано в начале 1830-х гг. английским ученым, основоположником учения об электромагнитном поле Майклом Фарадеем (1791–1867). В середине XIX в. Дж.К. Максвелл (1831–1879) составил системы математических уравнений, описывающих электромагнитные явления в вакууме и в сплошных средах. Один из выводов его теории заключался в том, что магнитное поле порождается движущимися зарядами и переменным электрическим полем (током смещения). В конце 1880-х гг. немецкий физик Г. Герц (1857–1894) экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

Электромагнитное излучение распространяется с конечной скоростью, зависящей от свойств среды (в вакууме – со скоростью света, равной $3 \cdot 10^8$ м/с), причем в каждой точке пространства электрическое и магнитное поля изменяются во времени периодически. Для быстрой смены полей, т. е. увеличения интенсивности колебаний, создают поле более высокой частоты. При взаимодействии электромагнитной волны со средой возможны такие явления, как отражение (например, от металлов, что нашло применение в радиолокации), поглощение, рассеивание и преломление.

Промышленное применение СВЧ-волн, распространяющихся с частотой 300 МГц–300 ГГц (с длиной волны – от 1 м до 1 мм), основано на явлении поглощения электромагнитных волн диэлектриками, полупроводниками, тканями живых организмов и бактериями. Степень поглощения энергии зависит от частоты поля, молекулярного строения, геометрической формы тела, температуры и ряда других параметров. Физическая природа поглощения электромагнитной энергии проявляется в возникновении поляризации (и появлении токов проводимости) – происходит смещение структурных элементов кристаллической решетки диэлектрика со своего нормального положения. Механизм поляризации может быть различным (электронная, ионная, дипольная, объемная, спонтанная, она же самопроизвольная) в зависимости от того, какие составляющие участвуют в этом процессе.

В идеальном диэлектрике (примером которого может служить дистиллированная вода) при отсутствии трения ток смещения I опережает по фазе напряженность поля E на четверть периода. Угол сдвига фаз φ между током и напряженностью поля составляет 90 градусов.

При наличии трения в диэлектрике возникает некоторое запаздывание по времени поляризации от электрического поля. Таким образом, ток смещения (ток поляризации) опережает напряженность поля на угол < 90 градусов.

Количество тепловой энергии (мощность, отнесенная к единице объема, Q (Вт/м³)), выделяющееся из диэлектрика, помещенного в электромагнитное поле, может быть вычислено как произведение плотности тока смещения I (А/м²), напряженности поля E (В/м) и косинуса угла сдвига между ними $\cos\varphi$:

$$Q = IE \cos\varphi. \quad (1)$$

Плотность тока смещения I (А/м²) равна произведению циклической частоты (числу колебаний за 2π секунд, т. е. $2\pi \cdot \nu$, где ν – частота поля (Гц)), диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ (Ф/м) (физической величины, показывающей степень ослабления электрического поля в диэлектрике по сравнению с вакуумом) и напряженности поля E (В/м):

$$I = 2\pi\nu\epsilon E. \quad (2)$$

В любом диэлектрике, поглощающем электромагнитную энергию, существует так называемый угол поглощения δ (угол диэлектрических потерь). Он дополняет до 90 градусов угол сдвига фаз φ между током и напряжением: $\varphi + \delta = 90$ градусов или $\varphi = 90$ градусов $-\delta$. Тогда выражение для косинуса угла сдвига с использованием формулы приведения можно будет представить в виде:

$$\cos\varphi = \cos(90 \text{ градусов} - \delta) = \sin\delta. \quad (3)$$

При малой величине угла можно считать, что его синус практически равен его тангенсу:

$$\sin\delta \approx \operatorname{tg}\delta, \quad (4)$$

где $\operatorname{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь, по величине которого принято оценивать свойства диэлектрических тел – чем его значение больше, тем сильнее диэлектрик нагревается в поле.

Таким образом, формулу (1) с учетом формул (2)–(4) для расчета Q (Вт/м³) можно записать в следующем виде:

$$Q = 2\pi\nu\varepsilon EE\cos\varphi = 2\pi\nu\varepsilon E^2\operatorname{tg}\delta.$$

В случае идеального диэлектрика, в котором полностью отсутствуют свободные заряды, состоящего исключительно из заряженных частиц, суммарный заряд которых равен 0, угол сдвига фаз φ составляет 90 градусов, т. е. $\delta = 0$, значит, и $Q = 0$, поэтому выделения тепла не происходит.

Становится понятно, что эффективность преобразования электромагнитной энергии в тепловую пропорциональна тангенсу угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости вещества, частоте поля и квадрату напряженности электрического поля в веществе. По величине получаемого эффекта выгоднее работать на возможно больших частотах, однако по мере проникновения в диэлектрик волна затухает, так как ее энергия переходит в теплоту: внутри объема достаточного уровня тепла не будет, а наружные слои будут испытывать перегрев, т. е. глубина проникновения L (м) обратно пропорциональна частоте поля ν (Гц): $L \approx 1/\nu$.

Большинство установок микроволнового нагрева функционирует на некой ком-промиссной частоте, составляющей 2450 МГц; также к разрешенным частотам для установок относится величина 915 МГц.

Обратим внимание, что тепловая энергия, выделяющаяся в диэлектрике, не зависит от его теплопроводности, что позволяет ускорить процесс микроволнового нагрева, по сравнению с другими его видами.

Конструкции установок микроволнового нагрева

Установки СВЧ-нагрева состоят из источника электромагнитной энергии (генератора) и рабочей камеры, связанных волноводами прямоугольного или коаксиального сечения, а также системы «загрузки–выгрузки». В качестве генераторов используют магнетроны (преобразователи потенциальной энергии электронов в энергию электромагнитных колебаний), а в отдельных случаях – клистроны (преобразователи кинетической энергии).

Установки могут быть периодического действия (камерные печи, когда термообрабатываемый материал нагревается в рабочей камере, оставаясь неподвижным или же вращаясь по кругу) или непрерывного действия (более производительные конвейерные установки с ленточными транспортерами, когда материал входит в рабочую камеру через одно устройство, перемещается вдоль рабочей камеры, нагреваясь до заданной температуры, и выгружается через другое устройство).

В зависимости от назначения микроволновые установки производят разной мощности – от малой (<0,5 кВт) до большой (>100 кВт). Маломощные установки могут быть бытовыми (например, для приготовления пищевых продуктов и разогрева блюд), среднемощные – лабораторными (для проведения различных научно-исследовательских работ), высокомощные – промышленного назначения (для технологических процессов в массовом производстве).

Некоторые установки используют бегущую волну и называются волноводными, а другие – стоячую волну и называются резонансными.

Конструктивные особенности систем загрузки и выгрузки материалов должны обеспечивать защиту обслуживающего персонала и окружающей среды от возможной утечки излучения, для чего требуется обязательное оснащение блокировкой, мгновенно выключающей подачу энергии в случае аварийной ситуации. Должно соблюдаться обеспечение заданного технологического режима в процессе эксплуатации и надежной работы генератора электромагнитных колебаний. Узкий по частоте спектр излучения магнетрона возбуждает относительно небольшое число видов колебаний. Увеличения их количества достигают одновременным использованием двух или нескольких магнетронов, а однородность нагрева улучшают применением различных «перемешивателей» электромагнитного поля и перемещением термообрабатываемого материала в камере [19, 26].

Основные области применения установок диэлектрического нагрева

Поскольку существует множество веществ, материалов и сред, способных к поглощению электромагнитной энергии СВЧ-диапазона, то этим и объясняется разнообразие областей применения установок диэлектрического нагрева. Первые из них появились за рубежом в 1930-х гг. и предназначались главным образом для сушки древесины. В нашей стране подобные устройства нашли применение на тридцать-сорок лет позже – в основном для термической обработки продуктов, содержащих воду.

В последние десятилетия более широкое распространение технологические процессы применения электромагнитного излучения получили в науке и в разных отраслях промышленности. Энергия СВЧ применяется все чаще для термической обработки материалов, изменения молекулярной структуры и фазового состава веществ. При выборе способа СВЧ-обработки часто решающее значение имеет возможность проведения избирательного нагрева.

Приведем несколько примеров применения современных микроволновых технологий: электронная техника; химическая промышленность – органический синтез, каталитические процессы, термообработка полимерных материалов, производство пластмасс, вулканизация резины; строительство – твердение бетона, размораживание и термоупрочнение грунта, производство кирпича и фанеры; сельское хозяйство – сушка зерна и семян, обработка почвы перед посевом; пищевая промышленность – сушка, пастеризация, размораживание, отверждение, стерилизация; медицина и фармацевтика – микроволновая радиометрия, экстракция, размораживание клеток и тканей, диатермия (глубокий прогрев подкожных тканей для снятия боли и ускорения заживления), микроволновая термоабляция злокачественных новообразований (локальное электромагнитное воздействие с разрушением опухолевой ткани), производство лекарств и стерилизация; микробиология (СВЧ-инактивация бактерий); текстильная и целлюлозно-бумажная промышленность; полиграфия; процессы переработки и утилизации бытовых полимерных отходов и другое [26–31].

Заключение

В следующей части статьи будут рассмотрены исследования в области применения энергии электромагнитного поля в производстве литых лопаток газотурбинных двигателей, направленные на увеличение интенсивности термообработки, ускорение проникновения излучения в глубину формы, экономию времени и расхода электроэнергии.

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

Список источников

1. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
2. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
3. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
4. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
5. Демонис И.М. Во все лопатки // Наука и жизнь. 2007. № 6. С. 40–44.
6. 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: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
7. 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: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
8. 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.
9. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 272 с.
10. Каблов Е.Н. С.Т. Кишкин и его вклад в развитие науки и материаловедения // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ, 2006. С. 5–11.
11. 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: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.
12. 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: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
13. 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.
14. Способ СВЧ-термообработки керамических литейных форм: пат. 2312733 Рос. Федерация; заявл. 03.03.05; опубл. 20.12.07.
15. Гаранин В.Ф., Озеров В.А., Муркина А.С., Куренкова О.А. Выплавление моделей из оболочковых форм // Литейное производство. 1997. № 2. С. 16–19.

16. 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.
17. Сапченко И.Г., Евстигнеев А.И., Костина Т.В. Особенности удаления моделей из оболочковых форм в ЛВМ // Литейное производство. 1999. № 2. С. 35–36.
18. 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> (дата обращения: 18.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-3-10.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Нарский А.Р. Изготовление оболочковых форм с применением СВЧ энергии // Металлургия машиностроения. 2005. № 5. С. 40–44.
23. Захватов Ю.К., Рева И.Л., Подымов А.Н. Удаление модельных масс из керамических форм в поле токов высокой частоты // Авиационные материалы. М., 1981. Вып. 6: Прогрессивные процессы литья охлаждаемых лопаток / под ред. В.М. Степанова, В.Г. Чубарова. С. 76–80.
24. 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: МЦНС «Наука и просвещение», 2024. С. 67–70.
25. Семенов А.С., Байбури В.Б. СВЧ-энергия и ее применение. Особенности, оборудование, технологические процессы. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1999. 116 с.
26. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 344 с.
27. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г., Килькеев Р.Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / под ред. А.Н. Шамова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 64 с.
28. Современные проблемы применения СВЧ энергии: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / под ред. В.А. Сосунова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1993. 104 с.
29. Коломейцев В.А., Комаров В.В., Железняк А.Р. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2006. Ч. 2. 232 с.
30. Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А.Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4 (3). С. 580–582.
31. Морозов С.М. Применение энергии микроволнового излучения в реализации и управлении технологических процессов. Вязьма, 2012. 305 с.

References

1. *Investment Casting*. Eds. Ya. I. Shklennik, V. A. Ozerov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 408 p.
2. Repyakh S. I. *Technological Fundamentals of Investment Casting*. Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p.
3. *History of Aviation Materials Science. VIAM – 80 Years: Years and People*. Ed. E. N. Kablov. Moscow: VIAM, 2012, 520 p.
4. Kablov E.N. *Cast Blades of Gas Turbine Engines. Alloys, Technologies, Coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.

5. Demonis I. M. At full speed. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 6, pp. 40–44.
6. 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: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
7. 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: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
8. Kablov E.N., Svetlov I.L., Demonis I.M., Folomeikin Yu.I. Single-crystal blades with transpiration cooling for high-temperature gas turbine engines. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, 2003, no. 1, pp. 24–33.
9. *Cast heat-resistant alloys. The effect of S.T. Kishkin: scientific and technical collection*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2006, 272 p.
10. Kablov E.N. S.T. Kishkin and his contribution to the development of science and materials science. *Proceedings of the Int. sc. and tech. conf. «Scientific ideas of S.T. Kishkin and modern materials science»*. Moscow: VIAM, 2006, pp. 5–11.
11. 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. 134–151. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-3-12.
12. 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: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-3-12.
13. 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.
14. *Method for Microwave Heat Treatment of Ceramic Casting Molds*: pat. 2312733 Rus. Federation; appl. 03.03.05; publ. 20.12.07.
15. Garanin V.F., Ozerov V.A., Murkina A.S., Kurenkova O.A. Melting of Patterns from Shell Molds. *Liteynoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 16–19.
16. Uglev N.P., Poilov V.Z., Merzlyakov K.S. et al. On the removal of pattern masses from ceramic shells during investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2015, no. 3, pp. 17–20.
17. 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.
18. 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> (accessed: March 18, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-3-10.
19. Selivanov Yu.A. Microwave energy in the processes of investment casting shaping. *Improving the quality and efficiency of investment casting: seminar materials*. Moscow: MDNTP, 1989, pp. 91–97.
20. Ozerov V.A., Garanin V.F., Murkina A.S. Melting of pattern compositions using microwave heating energy. *Improving the quality and efficiency of investment casting: seminar materials*. Moscow: MDNTP, 1986, pp. 108–110.
21. Kablov E.N., Demonis I.M., Deev V.V., Bondarenko O.A., Narsky A.R. Technology of removing pattern masses from ceramic molds for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2005, no. 3, pp. 12–14.
22. Narsky A.R. Manufacturing of shell molds using microwave energy. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2005, no. 5, pp. 40–44.
23. Zakhvatov Yu.K., Reva I.L., Podymov A.N. Removal of model masses from ceramic molds in a high-frequency current field. *Aviation materials*. Moscow, 1981, is. 6: Progressive processes of casting cooled blades. Eds. V.M. Stepanov, V.G. Chubarov, pp. 76–80.

24. Gutko Yu.I., Voitenko V.V., Medvedchuk S.A. Experimental studies of melting wax models from plaster casting molds by microwave radiation. *Science of the young – the future of Russia: Coll. art. VII All-Rus. sc.-pract. conf.* Penza: MCNS «Science and education», 2024, pp. 67–70.
25. Semenov A.S., Baiburin V.B. *Microwave energy and its application. Features, equipment, technological processes.* Saratov: Publ. house of Saratov Univ., 1999, 116 p.
26. Arkhangelsky Yu.S. *Dielectric heating units. Microwave units.* Saratov: Saratov State Tech. Univ., 2003. 344 p.
27. Knyazhevskaya G.S., Firsova M.G., Kilkeev R.Sh. *High-Frequency Heating of Dielectric Materials.* Ed. A.N. Shamov. 2nd ed., rev. and add. Leningrad: Mashinostroenie, 1989, 64 p.
28. *Modern Problems of Microwave Energy Application: Abstract of Report of the Int. Sc. and Tech. Conf.* Ed. V.A. Sosunov. Saratov: Saratov State Tech. Univ., 1993, 104 p.
29. Kolomeitsev V.A., Komarov V.V., Zheleznyak A.R. *Microwave Systems with Uniform Volumetric Heating.* Saratov: Saratov State Technical University, 2006, part 2, 232 p.
30. Morozov O.G., Samigullin R.R., Nasybullin A.R. Microwave technologies in the processes of recycling and utilization of household polymer waste. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2010, vol. 12, no. 4 (3), pp. 580–582.
31. Morozov S.M. *Application of microwave radiation energy in the implementation and control of technological processes.* Vyazma, 2012, 305 p.

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 12.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2026.
The article was submitted 12.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2026