

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-28-41

## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ФАСОННОГО ЛИТЬЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

М.А. Макушина<sup>1</sup>, П.В. Панин<sup>1</sup>, А.С. Кочетков<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Приведен обзор зарубежных публикаций, посвященных оборудованию и технологиям литья титановых сплавов. Рассмотрены все этапы литья: компьютерное моделирование литейных процессов и специальные программы для моделирования; оборудование и технологии изготовления выплавляемых и выжигаемых моделей, в том числе с использованием аддитивных технологий; материалы для изготовления керамических форм; традиционные и принципиально новые технологии изготовления отливок. Для каждого этапа отмечен уровень разработок и исследований НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

**Ключевые слова:** титан, литейные сплавы, отливки, восковая модель, тигель, расплав, литье по выплавляемым моделям

**Для цитирования:** Макушина М.А., Панин П.В., Кочетков А.С. Оборудование и технологии для фасонного литья титановых сплавов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-28-41.

Scientific article

## EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR SHAPED CASTING OF TITANIUM ALLOYS

М.А. Makushina<sup>1</sup>, P.V. Panin<sup>1</sup>, A.S. Kochetkov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** This article provides an overview of foreign publications about the equipment and technologies for casting of titanium alloys. All stages of casting are considered: computer modeling of casting processes and special modeling programs; equipment and manufacturing technologies for smelted and burnt models, including those using additive technologies; materials for the manufacture of ceramic molds; traditional and fundamentally new technologies for the direct manufacture of castings. For each section, the level of development and research of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM is noted.

**Keywords:** titanium, casting alloys, castings, wax model, crucible, melt, investment casting

**For citation:** Makushina M.A., Panin P.V., Kochetkov A.S. Equipment and technologies for shaped casting of titanium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-28-41.

## Введение

Высокие темпы развития современной авиационно-космической техники обуславливают потребность в новых материалах и разработках энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий изготовления элементов конструкций летательных аппаратов [1, 2]. Наиболее экономичным способом переработки материалов в изделия является фасонное литье, обеспечивающее высокие показатели коэффициента использования материала и выхода годного. С его помощью можно получить заготовку, для которой требуется минимальная механическая обработка или не требуется вовсе (в случае прецизионного литья) [3–5].

Среди металлов одним из наиболее перспективных и активно внедряемых в конструкции как планера, так и двигателей самолетов является титан. Его сплавы обладают достаточно высокими характеристиками удельной прочности и коррозионной стойкости, успешно используются в условиях повышенных температур [6].

Пик «расцвета» титанового литья в нашей стране пришелся на середину 1980-х гг. Тогда по всей стране было организовано ~28 производств титанового литья, выпускавших отливки габаритами от 2 до 15 м, массой от 30 г до 400 кг. Общие объемы производства титанового литья составляли до 780 т в год. Сейчас в нашей стране действует всего 5 производств титанового литья, объемы выпуска также существенно снизились и составляют менее 60 т в год. Однако потребность в отливках из титана по-прежнему существует на предприятиях авиастроительной отрасли.

Таким образом, вопросы технологии изготовления отливок из титановых сплавов являются актуальными, требующими изучения и создания новых перспективных разработок.

Кроме того, подтверждением актуальности и заинтересованности данной темой ученых по всему миру является количество статей и докладов на конференциях, опубликованных в научных изданиях. При подборе материала для данной статьи проведен анализ научных публикаций в иностранных изданиях за период с 2016 по 2024 г. По соответствующим ключевым словам найдено более 30000 публикаций, для анализа отобрана 41 публикация. Среди них преобладают статьи ученых из Китая и Германии. В рассмотренных статьях представлены результаты исследований и разработки, касающиеся различных этапов литья: компьютерного моделирования, изготовления выплавляемых и выжигаемых моделей, изучения материалов для огнеупорных литейных форм, а также литейного оборудования и методов литья. Помимо этого, присутствуют обзорные статьи обобщающего характера.

Необходимость в исследованиях и разработках технологий титанового литья наглядно продемонстрировали ученые из компании General Electric Aviation [7]. Они провели исследования с использованием компьютерного моделирования, которые показали, что узел из девяти деформированных алюминиевых деталей можно заменить одной титановой отливкой (рис. 1), повысив при этом весовую эффективность. Эти результаты подтверждены прочностными расчетами и натурными испытаниями механических свойств.

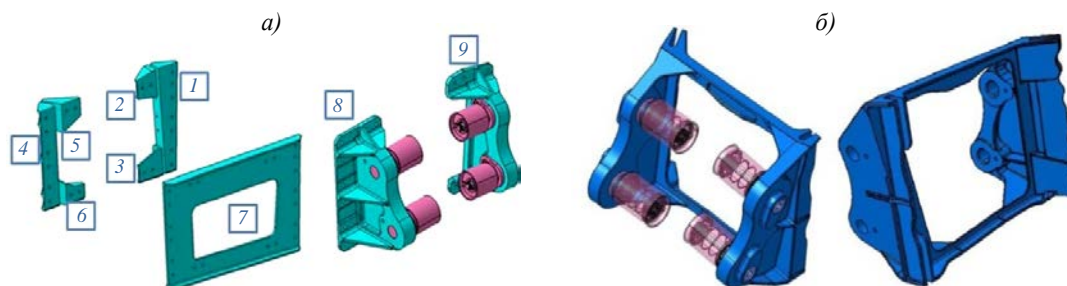


Рис. 1. 3D-модель заслонки из девяти деталей из алюминиевого сплава (а) и заслонки, отлитой из титанового сплава (б)

Согласно опубликованным данным, масса заслонки, собранной из нескольких частей из алюминиевого сплава, составляет 6,636 кг, в то время как отлитой из титанового сплава: 5,300 кг. При этом сохраняется способность детали выдерживать рабочие нагрузки.

Еще одним подтверждением интереса зарубежных коллег к теме титанового литья является география публикаций. Так, ученый из Нигерии подготовил публикацию о титановом литье [8]. О собственных исследованиях и разработках в ней не сообщается, статья носит обзорный характер, однако процесс изготовления титановых отливок по выплавляемым моделям описан подробно. Сформирована схема процесса (рис. 2), начиная от создания восковой модели до постобработки отливки.



Рис. 2. Схема процесса изготовления отливок из титановых сплавов

Следует отметить, что в схеме нигерийского ученого отсутствует очень важный первый этап, который, однако, упоминается в данной статье, – моделирование процесса литья.

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

### Компьютерное моделирование литейных процессов

В настоящее время этому этапу по праву отводится важная роль, о результатах моделирования написано много статей [9–11]. Для моделирования используются различные программы, самая распространенная из которых – ProCast, описанная в статье китайских ученых [9]. Такое программное обеспечение успешно используется в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Кроме того, распространена программа Flow3D, представленная в статье польских коллег [10]. Некоторые ученые разрабатывают собственные программы для моделирования, о чем упоминается в одной из работ китайских ученых [11]. Следует отметить, что приведенные в найденных статьях данные подтверждаются результатами реальных исследований, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов, даже для крупногабаритных отливок сложной формы (рис. 3). С помощью компьютерного моделирования можно существенно ускорить и удешевить разработки, например выбор конструкции литниково-питающей системы и режимов заливки. Поэтому моделирование – очень удобный и необходимый инструмент современного литейщика.

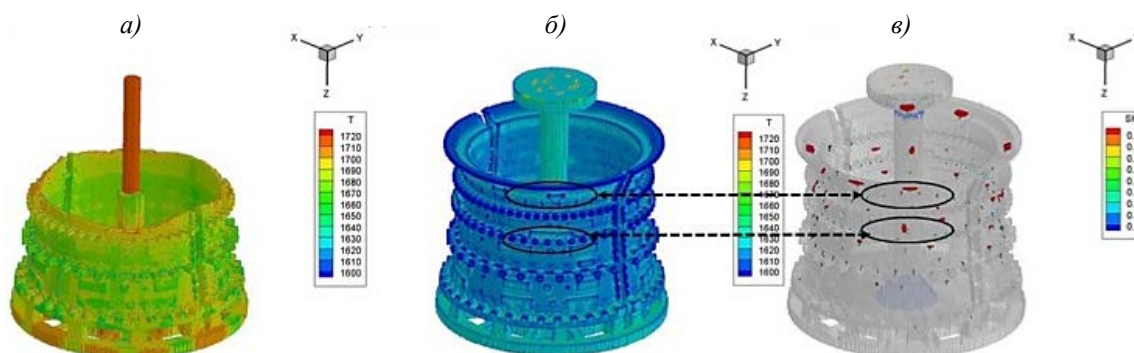


Рис. 3. Компьютерное моделирование заливки: *а* – заполнение формы расплавом металла; *б* – анализ температур при затвердевании; *в* – прогноз внутренних дефектов [11]

### Технологии изготовления моделей

Следующим этапом получения титановых отливок является изготовление моделей для огнеупорных форм. По традиционной для титановых сплавов технологии, реализованной в том числе в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, используются выплавленные восковые модели, которые изготавливаются на специальных прессах или шприц-машинах с использованием индивидуальных для каждого вида отливки пресс-форм. Такая технология обладает существенным недостатком – проектирование и изготовление пресс-форм являются очень долгими и трудозатратными процессами. Для решения этой проблемы в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ опробована технология получения восковых моделей с помощью силиконовых форм, не требующих таких огромных затрат на изготовление. Выход годных восковых моделей в таком случае заметно меньше ввиду отсутствия давления при подаче воска, автоматизированного контроля температуры расплавленного воска, температуры охлаждения и т. д. Кроме того, силиконовая пресс-форма имеет очень ограниченный срок функционирования из-за естественного износа и потери необходимых геометрических размеров, не подходит для изготовления сложнопрофильных и тонкостенных изделий. Поэтому такую технологию можно использовать только для штучного изготовления отливок простой конфигурации.

Во всем мире уже начинают внедрять аддитивные технологии для изготовления моделей. Такое направление даже получило название *rapid casting* (быстрое литье) [12]. Это, например, технология MJP (*Multijet Printing* – многоструйная печать), описанная в статье американских ученых (рис. 4) [13].



Рис. 4. Модели, полученные по технологии многоструйной печати (MJP) из воскоподобного материала (*а*), и отливки, изготовленные с их использованием (*б*) [13]

По своей сути метод МЖР похож на печать на струйном принтере, но только в трехмерном пространстве, т. е. специальная печатающая головка с несколькими соплами последовательно подает по капле воскоподобный материал в каждую точку будущей модели (рис. 5). Используя такой метод, можно получить очень гладкую поверхность. К преимуществам метода МЖР также относится применение воскоподобного материала, схожего по свойствам с модельными композициями, используемыми при традиционной технологии.

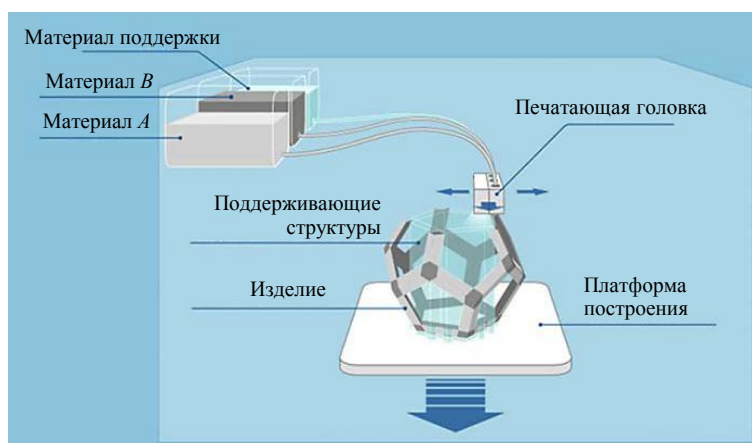


Рис. 5. Схема печати по технологии многоструйной печати (МЖР)

Для изготовления моделей также применяется стереолитография, как, например, в работе [14] (рис. 6). Авторы работы проанализировали многие методы аддитивных технологий, применяемые для изготовления выжигаемых и выплавляемых моделей, а на изучении и опробовании стереолитографии остановились гораздо более подробно, рассмотрев все аспекты, используемые материалы, достоинства и недостатки метода.

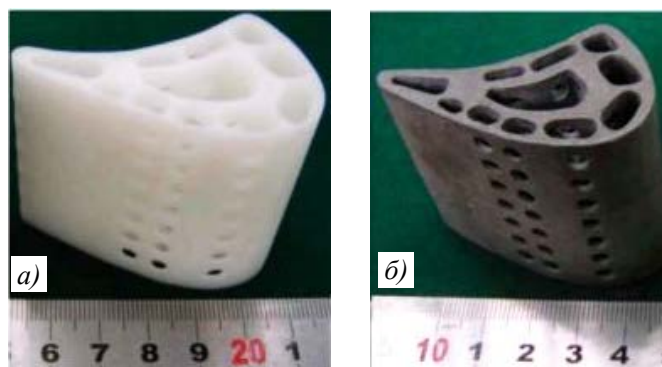


Рис. 6. Модель лопатки из фотополимерной смолы (а) и отливка лопатки, изготовленная с ее использованием (б) [14]

Метод стереолитографии реализуется следующим образом: платформа построения находится в специальной ванне с полимерной смолой, поверхность которой под действием луча полимеризуется в заданных местах, после чего платформа с будущей деталью опускается глубже в смолу, луч снова воздействует на поверхность в заданных точках, и так слой за слоем (рис. 7). Недостатками такой технологии являются необходимость использования (а значит и последующего удаления) поддержек, а также токсичность фотополимерной смолы. Такая технология реализована на одном из ведущих предприятий, занимающемся титановым литьем – ПАО «ОДК-УМПО».

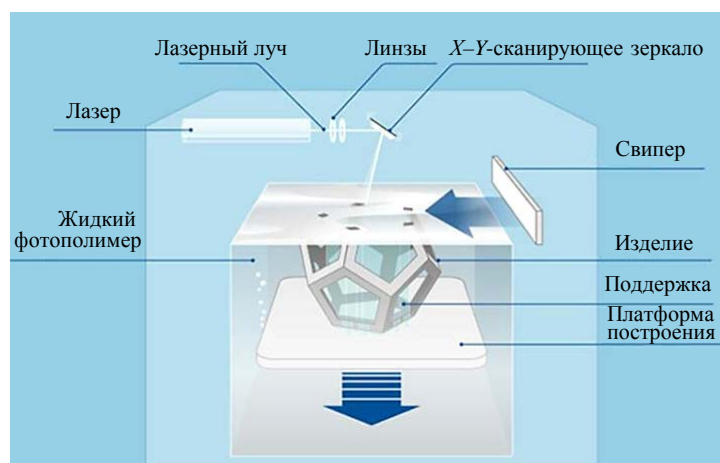


Рис. 7. Схема печати по технологии стереолитографии

Другой используемой технологией является FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование послойным наплавлением). Например, китайские ученые сообщают об успешном изготовлении зубчатого колеса из алюминиевого сплава по выжигаемой модели, изготовленной методом FDM (рис. 8) [15].

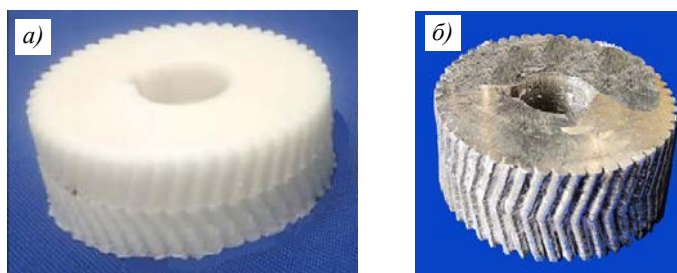


Рис. 8. Модель, изготовленная методом послойного наплавления (FDM) (а), и отливка зубчатого колеса, изготовленная с ее использованием (б) [15]

Модель строится путем послойного нанесения материала с использованием полимерной проволоки – стренги (рис. 9). Вследствие этого модель наследует ребристую поверхность, с чем пытаются бороться ученые по всему миру [13], предлагая лучшие способы расположения образца (рис. 10). Однако элементы литниково-питающей системы (чаши, стояки и т. д.), к которым не предъявляют требования по шероховатости поверхности, вполне возможно изготавливать по технологии FDM.

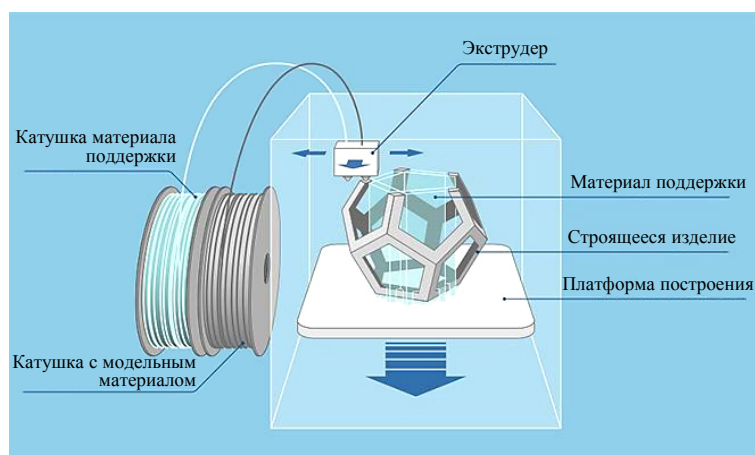


Рис. 9. Схема печати по технологии послойного наплавления (FDM)

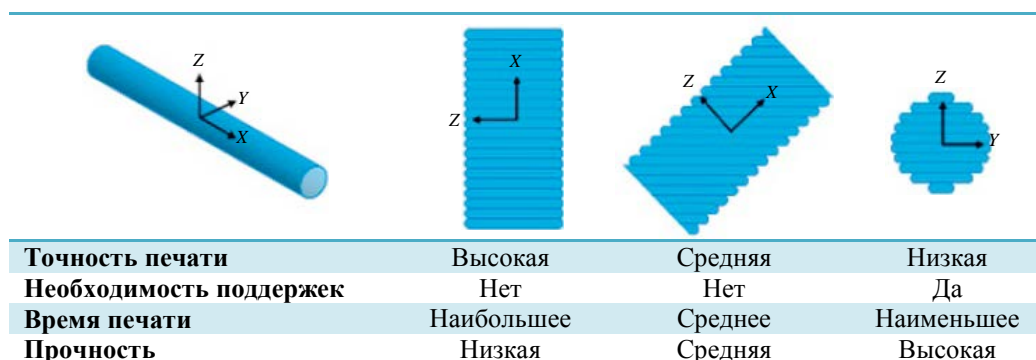


Рис. 10. Влияние расположения образца при печати методом послойного наплавления (FDM) на качество его поверхности [13]

При изучении отечественного рынка оборудования для изготовления выплавляемых и выжигаемых моделей обнаружена еще одна перспективная технология – ВЖТ (Binder Jet Technology – струйное нанесение). Ее суть заключается в послойной печати порошком полиметилметакрилата с пропиткой специальным связующим (рис. 11).

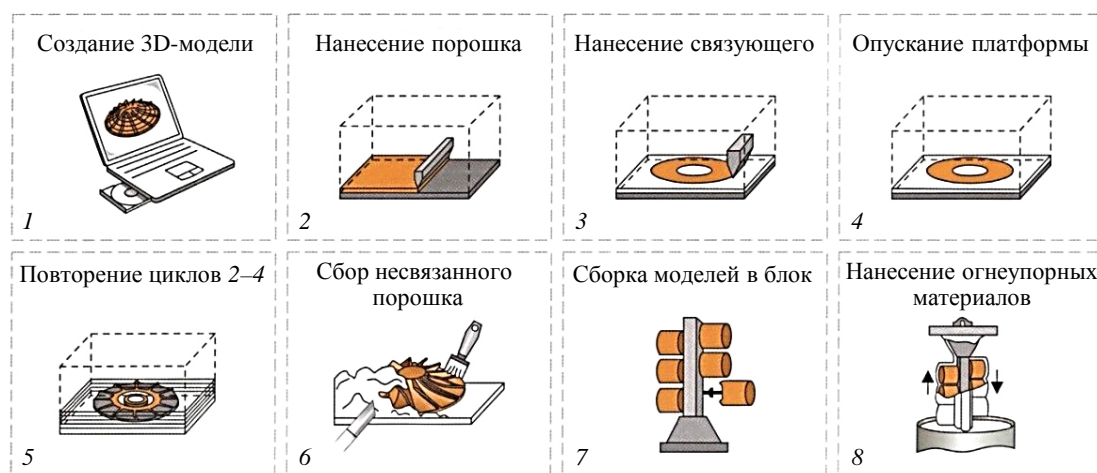


Рис. 11. Схема печати по технологии струйного нанесения (ВЖТ)

Таким образом, применение аддитивных технологий совместно с литьем по выплавляемым (выжигаемым) моделям является удобным и перспективным решением, которое позволит существенно улучшить точность изделий и продуктивность процессов [15].

Следующим витком развития направления rapid casting видится изготовление посредством аддитивных технологий сразу огнеупорных керамических форм [16, 17].

### Технологии изготовления форм

После получения моделей идет этап изготовления форм из огнеупорных материалов. Именно по этой теме найдено наибольшее количество статей. Основной проблемой, над решением которой работают зарубежные ученые, является взаимодействие расплава металла и поверхности формы. Так, например, ученые из Германии [18] исследовали поверхность отливок, изготовленных с применением разных форм (из электрокорунда, т. е. оксида алюминия, и из цирконата кальция) и тиглей, в которых расплавляется металл (медный водоохлаждаемый, с покрытиями из оксида иттрия и цирконата кальция). Согласно их исследованиям, наилучшая поверхность получается при использовании медного тигля и формы из оксида алюминия (рис. 12).



Рис. 12. Сравнительный анализ внешнего вида отливок, полученных с использованием разных материалов для тиглей и форм [18]

Вакуумно-индукционная печь, используемая в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для изготовления титановых отливок, оборудована именно таким медным водоохлаждаемым тиглем. Литейные формы по технологии, реализованной в институте, изготавливаются в настоящее время из оксида алюминия. Ранее исследованы формы с добавлением оксида иттрия [19]. Полученные результаты очень похожи на данные, представленные в работе американских ученых [20]. Частицы оксида иттрия с поверхности форм проникают в тело отливки, что приводит к неблагоприятным последствиям (рис. 13).

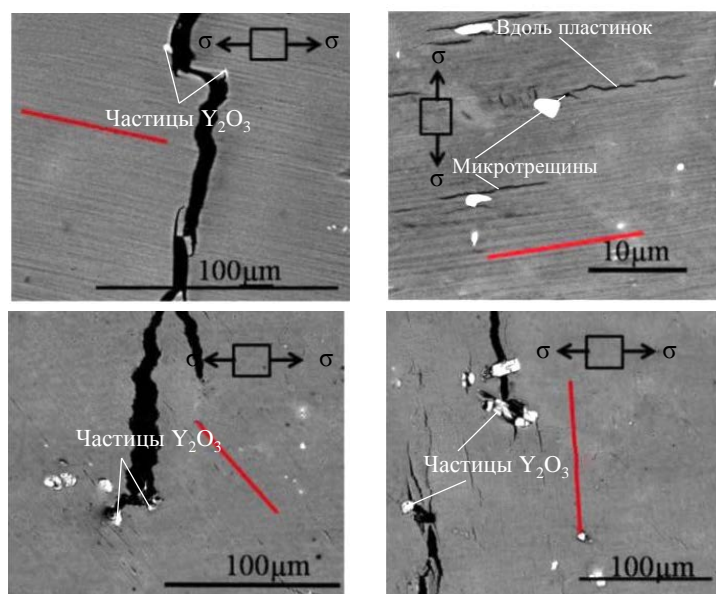


Рис. 13. Микроструктуры отливки с частицами оксида иттрия, проникшими в металл

Все опубликованные исследования и разработки, касающиеся литейных форм для титановых отливок, подробно проанализированы в статье украинских ученых [21].

Они сообщают, что среди керамических огнеупорных материалов наилучшую инертность к действию титановых сплавов показывают оксид иттрия, цирконаты кальция и бария. Однако из-за низкого уровня технологических свойств покрытия из них пока еще не получили широкого применения. Перспективными связующими материалами являются алюмозоли и золи циркония. Связующее на основе алюмозоля применяется в технологии изготовления форм, реализованной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Интересным направлением является повышение инертности корундовых форм путем их модифицирования добавками мелкодисперсного порошка титана.

### Технологии изготовления отливок

Основными методами литья являются вакуумно-индукционное, гарнисажное и электронно-лучевое. Центробежная заливка преобладает над стационарной. Эти методы хорошо известны и изучены. Например, в вакуумно-индукционной печи, используемой в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, реализовано вакуумно-индукционное литье с центробежной заливкой [22, 23].

Особый интерес представляет статья китайских ученых, которые сообщают об успешном опыте получения лопатки турбины низкого давления из интерметаллидного титанового сплава [24]. Разработанная ими общая технологическая схема изготовления похожа на схему, реализованную в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [23, 25]. Однако длина лопатки, изготовленной китайскими учеными, составляет всего 10 см (рис. 14), в то время как в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ получены лопатки длиной более 35 см. Но для китайских ученых это только начало пути, так как ранее только европейские ученые, например из компании General Electric Aviation, публиковали работы, посвященные изготовлению лопаток из интерметаллидных сплавов.

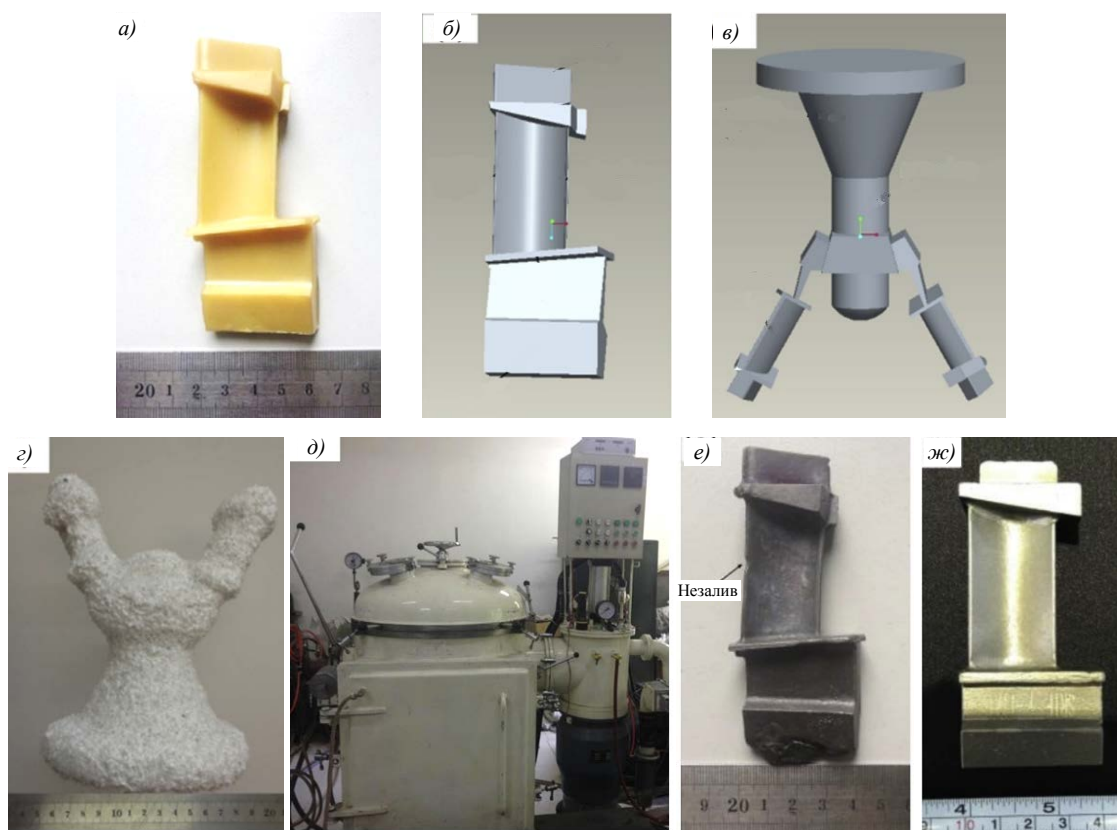


Рис. 14. Восковая модель лопатки (а); 3D-модели лопатки (б) и литниково-питающей системы (в); керамическая литейная форма (г); вакуумно-индукционная печь (д); отливки лопаток, залитые стационарно (е) и центробежно (ж) [24]

Следует также отметить принципиально новые технологии, например левитационную плавку [26]. Ученые из компании ALD (Германия) на конференции еще в 2016 г. сообщили о том, что моделируют такой процесс, а в настоящее время уже демонстрируют оборудование и подтверждают результаты успешных плавков (рис. 15).

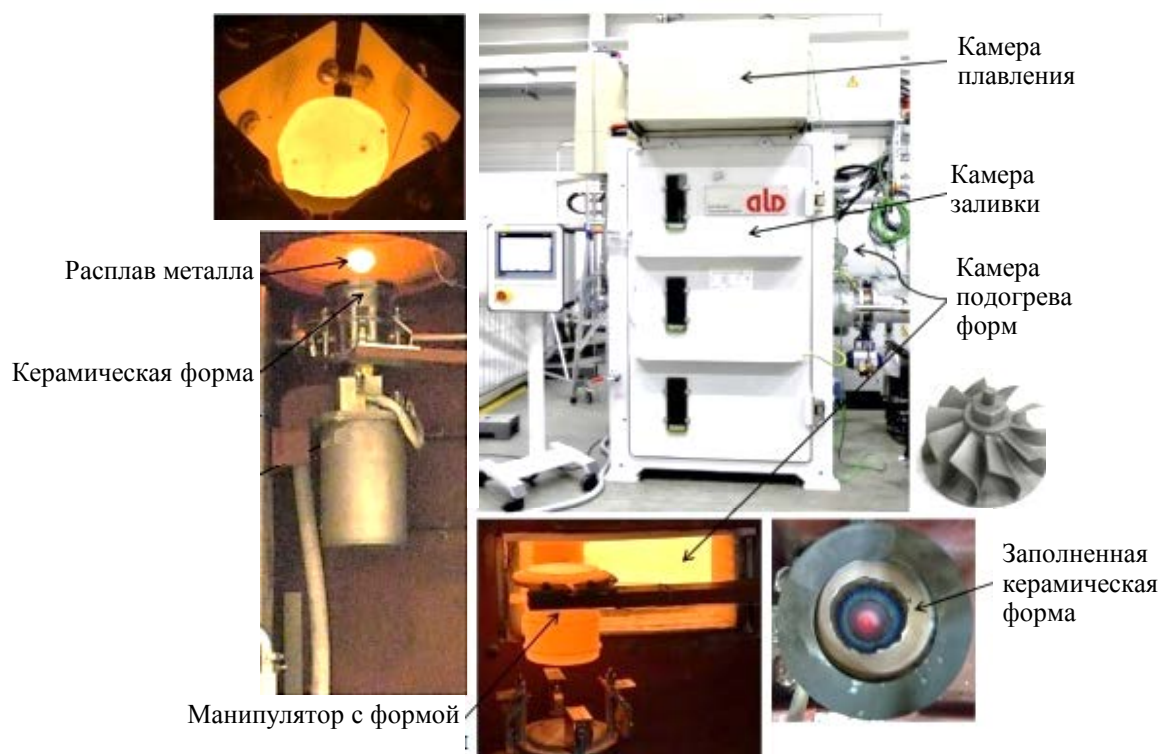


Рис. 15. Печь для левитационной плавки

Суть метода заключается в том, что металл в расплавленном состоянии под действием электромагнитных полей находится в подвешенном состоянии, т. е. исключается взаимодействие расплава со стенками тигля. После полного расплавления электромагнитные силы отключаются, и металл падает в установленную внизу форму. Однако в настоящее время таким образом можно расплавить не более 500 г сплава за один раз.

Другая нестандартная технология – это антигравитационное литье (рис. 16) [9]. При таком методе также исключается взаимодействие расплава со стенками тигля, металл под действием магнитных полей находится в «подвешенном» состоянии. Но основное различие технологий заключается в том, что расплав не падает, а, наоборот, под давлением подается вверх, что исключает влияние гравитационных сил (рис. 16, а). По мнению авторов, гравитация вносит существенный вклад в формирование внутренних дефектов в отливках.

Работа [9] также интересна тем, что авторы провели многочисленные исследования с помощью компьютерного моделирования и подтвердили полученные результаты экспериментально. При моделировании китайские ученые варьировали три параметра заливки (давление, температуры подогрева формы и перегрева расплава), исследуя по три значения каждого из них. Таким образом, получили серию из 9 экспериментов. При этом оценили влияние параметров на образцы разного по форме и размеру сечения, а также на ступенчатый образец (рис. 16, б).

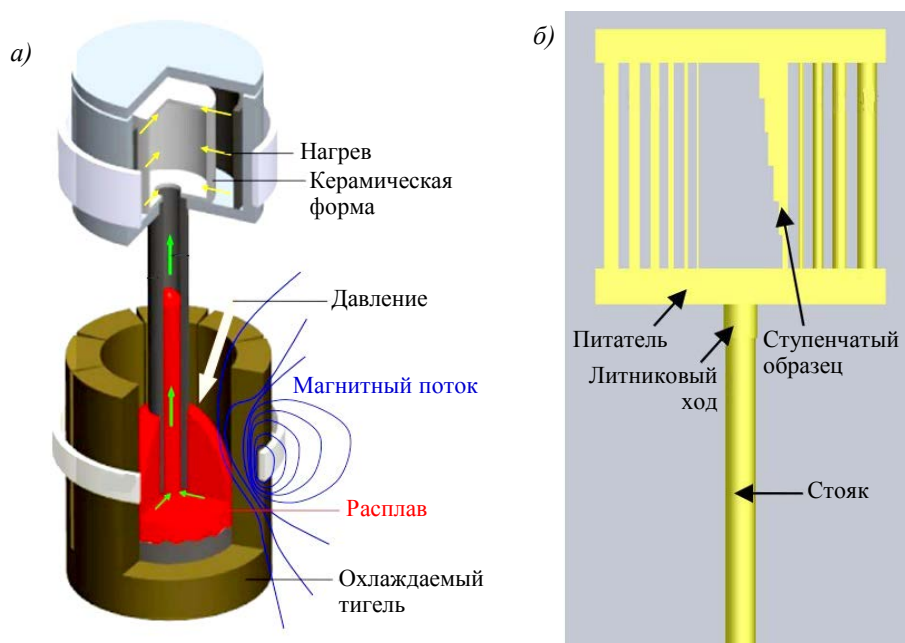


Рис. 16. Принципиальная схема реализации антигравитационного литья (а) и 3D-модель полученных образцов (б) [9]

### Заключения

Применение титановых отливок вместо деформированных полуфабрикатов ведет к повышению коэффициента использования материала, снижению объема механической обработки, трудозатрат и стоимости.

Компьютерное моделирование процессов литья существенно ускоряет разработку литниково-питающей системы и режимов литья, заменяет большую часть натурных исследований.

Для изготовления выплавляемых моделей в мире, помимо традиционных прессов, используют аддитивное производство, что позволяет существенно ускорить и упростить процесс. По мнению многих ученых, будущее за сочетанием традиционных литейных технологий и аддитивного производства.

Согласно результатам многочисленных исследований, наименьшее взаимодействие расплава с материалом формы происходит при плавке в медном охлаждаемом тигле и заливке в формы на основе  $\text{CaZrO}_2$ . Существуют и другие перспективные направления, например модифицирование форм добавками порошка титана.

Основными методами литья являются вакуумно-индукционное, гарнисажное и электронно-лучевое. Центробежная заливка используется чаще, чем стационарная. Разрабатываются альтернативные методы, такие как антигравитационное и левитационное литье.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Журнал неорганической химии. 2020. Т. 65. № 6. С. 846–855.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.

5. Новак А.В., Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Заводов А.В. Влияние технологических параметров обработки на морфологию структуры и механические свойства интерметаллидного титанового орто-сплава // Мат. всеросс. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области деформируемых и литейных интерметаллидных сплавов на основе титана и никеля». М.: ВИАМ, 2018. С. 112–125.
6. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
7. Agarwal A., Basile E., Bowler J. et al. Alternative technologies and design for metallic parts in aviation: the use of Titanium investment casting for aircraft structural components // Conference Paper of 5th Aircraft Structural Design Conference. Manchester, 2016. P. 457–465.
8. Ndukwe A.I. Review of recent findings on investment casting of titanium alloys // Academic journal of manufacturing engineering. 2022. Vol. 20. Is. 2. P. 99–108.
9. Yang J., Wang H., Wu Y. et al. Numerical calculation and experimental evaluation of counter-gravity investment casting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 3295–3309. DOI: 10.1007/s00170-018-1784-5.
10. Karwinski A., Lesniewski W., Wieliczko P., Małyszka M. Casting of titanium alloys in centrifugal induction furnaces // Archives of metallurgy and materials. 2014. Vol. 59. Is. 1. P. 403–406. DOI: 10.2478/amm-2014-0068.
11. Taoa P., Shaoa H., Jib Z. et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing // Progress in Natural Science: Materials International. 2018. Vol. 28. Is. 4. P. 520–528. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.06.005.
12. Wu H., Li D., Tang Y. et al. Rapid casting of hollow turbine blades using integral ceramic moulds // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2009. Vol. 223. P. 695–702. DOI: 10.1243/09544054JEM1366.
13. Wang J., Sama S.R., Lynch P.C., Manogharan G. Design and topology optimization of 3D-Printed wax patterns for rapid investment casting // Procedia – Manufacturing. 2019. Vol. 34. P. 683–694. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.224.
14. Mukhtarkhanov M., Perveen A., Talamona D. Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting // Micromachines. 2020. No. 11. P. 946–973. DOI: 10.3390/mi11100946.
15. Ma C., Zhang Y., Zhang H., Wu L. Manufacturing of herringbone gear model by 3D printing assisted investment casting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 332. No. 4. Art. 042045. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/042045.
16. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Колмогоров А.Ю., Гуров Д.А., Чайникова А.С. Возможность применения технологии послойного наплавления (FDM) для получения керамических изделий // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
17. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Беляченков И.О., Прокофьев В.А. Получение керамических материалов методом стереолитографии // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
18. Klotz U.E., Legner C., Bulling F. et al. Investment casting of titanium alloys with calcium zirconate moulds and crucibles // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. No. 103. P. 343–353. DOI: 10.1007/s00170-019-03538-z.
19. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Кочетков А.С. Особенности технологии изготовления высокоогнеупорных керамических форм для получения отливок из  $\gamma$ -TiAl сплавов // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40.
20. Uwanyuze R.S., Kanyo J.E., Myrick S.F., Schafföner S. A review on alpha case formation and modeling of mass transfer during investment casting of titanium alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 865. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158558.
21. Kaliuzhnyi P., Mykhnian O.V., Voron M., Tymoshenko A. Problems of materials choice for ceramic molds to obtain titanium alloys shape castings // Casting processes. 2021. Vol. 4. No. 146. P. 55–65. DOI: 10.15407/plit2021.04.055.

22. Макушина М.А., Кочетков А.С., Виноградов И.Д. Влияние различных режимов горячего изостатического прессования и термической обработки на структуру и свойства отливок из сплава ВТ40Л // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
23. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд., с изм. и доп. М.: ВИАМ, 2019. 316 с.
24. Yang L., Chai L.H., Liang Y.F. et al. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb–TiAl alloy // *Intermetallics*. 2015. No. 66. P. 149–155. DOI: 10.1016/j.intermet.2015.07.006.
25. Антипов В.В., Ночовная Н.А., Кочетков А.С., Панин П.В., Дзунович Д.А. Влияние технологических параметров литья на качество фасонных отливок из нового жаропрочного сплава на основе TiAl // Вестник МАИ. 2018. Т. 25. № 3. С. 220–228.
26. Spitans S., Bauer C., Franz H. et al. Investment castings with unique levitation melting technology FastCast // Conference Paper 68th Investment Casting Institute technical conference & expo 2021. Michigan: Investment Casting Institute, 2021. P. 181–186.

### References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Zhurnal neorganicheskoy khimii*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 846–855.
4. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
5. Novak A.V., Nochovnaya N.A., Alekseev E.B., Zavodov A.V. Influence of technological processing parameters on the morphology of the structure and mechanical properties of intermetallic titanium ortho-alloy. *Reports All-Rus. scientific-technical conf. «Fundamental and applied research in the field of deformable and cast intermetallic alloys based on titanium and nickel»*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 112–125.
6. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. et al. *Technology of production of titanium aircraft structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 448 p.
7. Agarwal A., Basile E., Bowler J. et al. Alternative technologies and design for metallic parts in aviation: the use of Titanium investment casting for aircraft structural components. *Conference Paper of 5th Aircraft Structural Design Conference*. Manchester, 2016, pp. 457–465.
8. Ndukwe A.I. Review of recent findings on investment casting of titanium alloys. *Academic journal of manufacturing engineering*, 2022, vol. 20, is. 2, pp. 99–108.
9. Yang J., Wang H., Wu Y. et al. Numerical calculation and experimental evaluation of counter-gravity investment casting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 96, p. 3295–3309. DOI: 10.1007/s00170-018-1784-5.
10. Karwinski A., Lesniewski W., Wieliczko P., Małyszka M. Casting of titanium alloys in centrifugal induction furnaces. *Archives of metallurgy and materials*, 2014, vol. 59, is. 1, pp. 403–406. DOI: 10.2478/amm-2014-0068.
11. Taoa P., Shaoa H., Jib Z. et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018, vol. 28, is. 4, pp. 520–528. DOI: 10.1016/j.pnsc.2018.06.005.
12. Wu H., Li D., Tang Y. et al. Rapid casting of hollow turbine blades using integral ceramic moulds. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009, vol. 223, pp. 695–702. DOI: 10.1243/09544054JEM1366.
13. Wang J., Sama S.R., Lynch P.C., Manogharan G. Design and topology optimization of 3D-Printed wax patterns for rapid investment casting. *Procedia – Manufacturing*, 2019, vol. 34, pp. 683–694. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.224.
14. Mukhtarkhanov M., Perveen A., Talamona D. Application of stereolithography based 3D printing technology in investment casting. *Micromachines*, 2020, no. 11, pp. 946–973. DOI: 10.3390/mi11100946.

15. Ma C., Zhang Y., Zhang H., Wu L. Manufacturing of herringbone gear model by 3D printing assisted investment casting. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 332, no. 4, art. 042045. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/042045.
16. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Kolmogorov A.Yu., Gurov D.A., Chainikova A.S. Possibility of using layer-by-layer deposition technology (FDM) to produce ceramic products. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-64-76.
17. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Belyachenkov I.O., Prokofiev V.A. Obtaining of ceramic materials by stereolithography method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 27, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
18. Klotz U.E., Legner C., Bulling F. et al. Investment casting of titanium alloys with calcium zirconate moulds and crucibles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 103, pp. 343–353. DOI: 10.1007/s00170-019-03538-z.
19. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Kochetkov A.S. Features of the manufacturing technology of highly refractory ceramic molds for castings from  $\gamma$ -TiAl alloys. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40.
20. Uwanyuze R.S., Kanyo J.E., Myrick S.F., Schafföner S. A review on alpha case formation and modeling of mass transfer during investment casting of titanium alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 865, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.158558.
21. Kaliuzhnyi P., Mykhnian O.V., Voron M., Tymoshenko A. Problems of materials choice for ceramic molds to obtain titanium alloys shape castings. *Casting processes*, 2021, vol. 4, no. 146, pp. 55–65. DOI: 10.15407/plit2021.04.055.
22. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Vinogradov I.D. The influence of various modes of hot isostatic pressed and heat treatment on structure and properties of castings from the VT40L alloy. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-24-34.
23. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. 2nd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2019, 316 p.
24. Yang L., Chai L.H., Liang Y.F. et al. Numerical simulation and experimental verification of gravity and centrifugal investment casting low pressure turbine blades for high Nb–TiAl alloy. *Intermetallics*, 2015, no. 66, pp. 149–155. DOI: 10.1016/j.intermet.2015.07.006.
25. Antipov V.V., Nochovnaya N.A., Kochetkov A.S., Panin P.V., Dzunovich D.A. Influence of technological parameters of casting on the quality of shaped castings from a new heat-resistant alloy based on TiAl. *Vestnik MAI*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 220–228.
26. Spitans S., Bauer C., Franz H. et al. Investment castings with unique levitation melting technology FastCast. *Conference Paper 68th Investment Casting Institute technical conference & expo 2021*. Michigan: Investment Casting Institute, 2021, pp. 181–186.

#### Информация об авторах

**Макушина Марина Александровна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Панин Павел Васильевич**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Алексей Сергеевич Кочетков**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Marina A. Makushina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Pavel V. Panin**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexey S. Kochetkov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 02.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.12.2024.  
The article was submitted 02.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 09.12.2024.