

**№4**  
**(146)**  
**2025**

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт  
авиационных материалов



# ТРУДЫ ВИАМ



---

# ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 4 (146) апрель 2025

**Учредитель периодического издания:**

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

**Редакционный совет**

**Председатель совета – главный редактор:**

Каблов Е.Н. академик РАН, профессор (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:**

Антипов В.В. докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Члены совета:**

|                 |                                                                                            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Демонис И.М.    | канд. техн. наук                                                                           |
| Кокорин В.Н.    | докт. техн. наук, профессор (Ульяновский государственный технический университет)          |
| Кондрашов С.В.  | докт. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)                                                   |
| Лаптев А.Б.     | докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)                                      |
| Леонтьев Л.И.   | академик РАН, профессор (РАН)                                                              |
| Ночовная Н.А.   | докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)                                      |
| Пенязьков О.Г.  | академик НАН Беларуси, профессор (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, Беларусь) |
| Райтер Г.       | докт. наук (ALD Vacuum Technologies GmbH, Германия)                                        |
| Старцев В.О.    | докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)                                      |
| Стороженко П.А. | академик РАН, профессор (АО «ГНИИХТЭОС»)                                                   |
| Тимофеев А.Н.   | докт. техн. наук (ОАО «Композит»)                                                          |
| Аграфенина Е.А. | ответственный секретарь (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)                               |

---

**Издатель:** НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

**Редакция:**

редакторы – Е.А. Аграфенина, Н.В. Ананьева;  
корректор – И.С. Туманова; верстка – М.С. Закржевская

**Адрес редакции:**

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Тел.: +7 (499) 263-89-50, +7 (499) 263-87-37; факс: +7 (499) 267-86-09;  
e-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru); сайт: <http://viam-works.ru>

---

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-82678 от 27.01.2022

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ),  
реферативно-информационную базу данных RSCI (Russian Science Index на платформе Web of Science)  
Журнал входит в Международную ассоциацию издателей (PILA – Publishers International Linking Association).  
Всем статьям, публикуемым в журнале, присваиваются индексы DOI (Digital Object Identifier).

В сведениях об авторах указываются данные, актуальные на момент предоставления рукописи в редакцию.

# ТРУДЫ ВИАМ

# TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### Жаропрочные сплавы и стали

**Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н., Мокеев Н.А.** Изготовление модельных композиций для литья по выплавляемым моделям в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

3

### Легкие сплавы

**Ширяев А.А., Арисланов А.А., Путьрский С.В., Востриков Н.Ф.** Опыт применения отходов аддитивного производства при изготовлении пористых полуфабрикатов из титановых сплавов BT1-00 и VT6

14

**Макушина М.А., Панин П.В., Кочетков А.С.** Оборудование и технологии для фасонного литья титановых сплавов

28

**Волкова Е.Ф., Алиханян А.А., Акинина М.В., Мостяев И.В.** Новые технологические процессы при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов

42

**Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуюнова В.А., Токарев М.С.** Современные подходы к повышению качества литья и локальному ремонту изделий из магниевых сплавов

57

### Композиционные материалы

**Постнов В.И., Постнова М.В., Антипов В.В., Вешкин Е.А.** Исследование динамических характеристик образцов из металлополимерных материалов и алюминиевого сплава D16ch-AT

70

### Heat-resistant alloys and steels

**Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N., Mokeev N.A.** Production of model compositions for investment casting in the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM

### Light-metal alloys

**Shiryaev A.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Vostrikov N.F.** Experience of using additive manufacturing waste in the production of porous semi-finished products from titanium alloys VT1-00 and VT6

**Makushina M.A., Panin P.V., Kochetkov A.S.** Equipment and technologies for shaped casting of titanium alloys

**Volkova E.F., Alikhanyan A.A., Akinina M.V., Mostyaev I.V.** New technological processes in the production of high-quality semi-finished products from magnesium alloys

**Trofimov N.V., Leonov A.A., Duyunova V.A., Tokarev M.S.** Modern approaches to improving the quality of casting and local repairs of products made of magnesium alloys

### Composite materials

**Postnov V.I., Postnova M.V., Antipov V.V., Veshkin E.A.** Study of dynamic characteristics of samples from metal-polymeric materials and aluminium alloy D16ch-AT

---

---

**Защитные и функциональные  
покрытия**

**Захаров К.Е., Фомина М.А., Вдовин А.И., Чумакова Е.С.** Оценка эффективности состава для низкотемпературного наполнения сернокислотного анодно-оксидного покрытия и способы его альтернативного применения

**Испытания материалов**

**Старцев О.В., Коваль Т.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В., Велигодский И.М.** Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита

**Ермишев В.Ю.** Выделение бактериальных штаммов деструкторов полимерных материалов из образцов оборотной охлаждающей воды нефтеперерабатывающего и нефтехимического заводов

**Protective and functional  
coatings**

81 **Zakharov K.E., Fomina M.A., Vdovin A.I., Chumakova E.S.** Efficiency evaluation of the composition for low-temperature filling of sulfuric acid anodic-oxide coating and methods of its alternative application

**Material tests**

96 **Startsev O.V., Koval T.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V., Veligodsky I.M.** Research of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in a moderately warm climate. Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite

107 **Ermishev V.Yu.** Isolation of bacterial strains of polymer materials destructors from samples of recycled cooling water from oil refineries and petrochemical plants

Научная статья

УДК 621.74.043.2

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

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ  
В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ***Т.Л. Форостович<sup>1</sup>, А.Р. Нарский<sup>1</sup>, О.Н. Битюцкая<sup>1</sup>, Н.А. Мокеев<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.** Представлен обзор материалов, связанных с технологическим процессом производства современных модельных композиций для литья по выплавляемым моделям ответственных деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Рассматриваются общие характеристики модельных композиций, включая состав и основные требования к ним, а также вопросы деятельности производственного участка, созданного в середине 2010-х гг. и выпускающего широкий ассортимент высококачественных модельных композиций на основе отечественного сырья.

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

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

Scientific article

**PRODUCTION OF MODEL COMPOSITIONS FOR INVESTMENT CASTING  
IN THE NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE» – VIAM***T.L. Forostovich<sup>1</sup>, A.R. Narsky<sup>1</sup>, O.N. Bityutskaya<sup>1</sup>, N.A. Mokeev<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.** The article presents an overview of materials related to the technological process of production of modern model compositions for casting of critical parts of gas turbine engines from nickel superalloys made by the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. The general characteristics of model compositions are considered, including the composition and basic requirements for them, as well as issues of the activity of the manufacturing area established in the mid-2010s and producing a wide range of high-quality model compositions based on domestic raw materials.

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

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

### **Введение**

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

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

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

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

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

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

### **Общая характеристика модельных композиций, применяемых для получения литых ответственных деталей**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

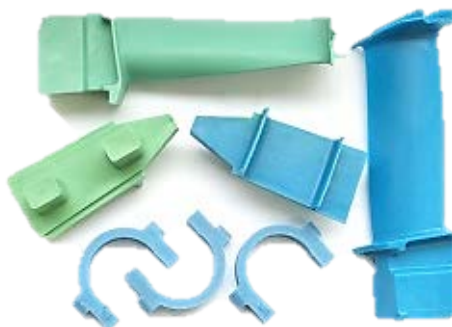


Рис. 1. Модели деталей газотурбинных двигателей из модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Рис. 2. Термостат для определения теплоустойчивости парафина



Рис. 3. Аппарат для определения температуры размягчения нефтепродуктов



Рис. 4. Прибор для определения пенетрации нефтепродуктов

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

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

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

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

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

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



Рис. 5. Аппарат для определения температуры каплепадения нефтепродуктов



Рис. 6. Модели лопаток газотурбинного двигателя

### **Исследования в области модельных композиций**

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

### **Заключения**

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

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

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

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

### **Список источников**

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

6. Оспенникова О.Г., Асланян И.Р. Направления развития технологии изготовления модельных композиций для лопаток и других деталей ГТД // Литейное производство. 2018. № 3. С. 20–24.
7. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
8. Каблов Е.Н. Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизации // Газотурбинные технологии. 2000. № 3. С. 10–13.
9. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
10. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Суrowa В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
12. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М., Орехов Н.Г. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 60–70.
13. Братухин А.Г., Шалин Р.Е., Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Орехов Н.Г. Литые монокристалльные турбинные лопатки // Литейное производство. 1993. № 6. С. 3–6.
14. Асланян И.Р., Оспенникова О.Г. Современные тенденции развития технологии изготовления модельных композиций для литья жаропрочных сплавов // Сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования в области создания литейных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов и высокоэффективных технологий изготовления деталей ГТД» (9 ноября 2017 г., г. Москва). М.: ВИАМ, 2017. С. 49–58.
15. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций // Литейное производство. 2016. № 10. С. 26–28.
16. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
17. Гапанькова Е.И., Латышевич И.А. Модельные композиции для литья по выплавляемым моделям // Сб. материалов Пятого междисциплинарного науч. форума с междунар. участием «Новые материалы и перспективные технологии» (30 октября – 1 ноября 2019 г., г. Москва): в 2 т. М.: НПП «ИСИС», 2019. Т. II. С. 100–102.
18. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2600468 Рос. Федерация; заявл. 20.03.15; опубл. 10.08.16.
19. Ечин А.Б., Дейнега Г.И., Нарский А.Р. Новые разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Форостович Т.Л., Нарский А.Р., Битюцкая О.Н., Мокеев Н.А. Гранулирование модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
21. Оспенникова О.Г. Исследование влияния наполнителей на свойства и стабильность модельных композиций, выбор оптимальных составов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
22. Оспенникова О.Г. Исследование и разработка параметров технологического процесса изготовления моделей из модельных композиций на основе синтетических восков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.

23. Асланян И.Р., Гусева М.А., Оспенникова О.Г. Сравнительное исследование физико-механических и реологических характеристик модельных композиций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 6. С. 34–39.
24. Гусева М.А., Асланян И.Р. Влияние наполнителей на реологические характеристики модельных композиций для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
25. Асланян И.Р., Рассохина Л.И., Оспенникова О.Г. Определение количественных факторов, существенно влияющих на технологические характеристики модельных композиций // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
26. Асланян И.Р., Еремкина М.С. Методология исследования модельных композиций для литья лопаток ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 8. С. 28–32.
27. Асланян И.Р., Рассохина Л.И., Оспенникова О.Г. Применение полного факторного эксперимента при разработке модельных композиций // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 10. С. 20–26.
28. Каблов Е.Н., Демонис И.М., Деев В.В., Бондаренко О.А., Нарский А.Р. Технология удаления модельных масс из керамических форм для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2005. № 3. С. 12–14.

### References

1. Kablov E.N. Aviation Materials Science: Results and Prospects. *Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Demonis I.M. At Full Speed. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 6, pp. 40–44.
3. *Investment Casting*. Ed. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerov. 3rd ed. Moscow: Mashinostroyenie, 1984, 408 p.
4. Gini E.Ch., Zarubin A.M., Rybkin V.A. *Special Casting Technologies*. Moscow: Publ. House of Bauman Moscow State Tech. Univ., 2010, 368 p.
5. Ospennikova O.G. Heat-resistant alloys of a new generation and model compositions for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 3, pp. 17–20.
6. Ospennikova O.G., Aslanyan I.R. Directions for the development of technology for the manufacture of model compositions for blades and other gas turbine engine parts. *Liteynoe proizvodstvo*, 2018, no. 3, pp. 20–24.
7. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
8. Kablov E.N. Production of turbine blades for gas turbine engines by directional crystallization. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 2000, no. 3, pp. 10–13.
9. Kablov E.N. *Cast blades for gas turbine engines. Alloys, technologies, coatings*. 2nd ed. Moscow: Nauka, 2006, 632 p.
10. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
12. Kablov E.N., Toloraia V.N., Demonis I.M., Orekhov N.G. Directional crystallization of heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 60–70.
13. Bratukhin A.G., Shalin R.E., Kablov E.N., Toloraia V.N., Orekhov N.G. Cast single-crystal turbine blades. *Liteynoe proizvodstvo*, 1993, no. 6, pp. 3–6.
14. Aslanyan I.R., Ospennikova O.G. Modern trends in the development of technology for the manufacture of model compositions for casting heat-resistant alloys. *All-Rus. scientific-technical conf. «Fundamental and applied research in the field of creating heat-resistant nickel and intermetallic casting alloys and highly efficient technologies for manufacturing gas turbine engine parts»* (November 9, 2017, Moscow). Moscow: VIAM, 2017, pp. 49–58.

15. Ospennikova O.G. Thermophysical and rheological characteristics of synthetic resins for model compositions. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 10, pp. 26–28.
16. Repyakh S.I. *Technological foundations of investment casting*. Dnepropetrovsk: Lira, 2006, 1056 p.
17. Gapankova E.I., Latyshevich I.A. Model compositions for investment casting. *Reports Fifth Interdisciplinary Scientific Forum with International Participation «New Materials and Advanced Technologies»* (October 30 – November 1, 2019, Moscow): in 2 vols. Moscow: NPP ISIS, 2019, vol. II, pp. 100–102.
18. *Composition for the manufacture of investment models*: pat. 2600468 Rus. Federation; appl. 20.03.15; publ. 10.08.16.
19. Echin A.B., Deynaga G.I., Narsky A.R. New developments of NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in the field of materials for casting processes of superalloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
20. Forostovich T.L., Narsky A.R., Bityutskaya O.N., Mokeev N.A. Granulation of model compositions produced by National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM for castings on smelted models. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.
21. Ospennikova O.G. Influence research of fillers on properties and stability of modelling compositions, a choice of optimum structures. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 14–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-14-17.
22. Ospennikova O.G. Research and working out of parametres of technological process of manufacturing of models from modelling compositions on the basis of synthetic waxes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 18–21. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-18-21.
23. Aslanyan I.R., Guseva M.A., Ospennikova O.G. Comparative study of physical, mechanical and rheological characteristics of model compositions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 6, pp. 34–39.
24. Guseva M.A., Aslanyan I.R. The effect of fillers on the rheology of model composition. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
25. Aslanyan I.R., Rassokhina L.I., Ospennikova O.G. Definition of quantitative factors, significantly influencing on technological characteristics of model compositions. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-3-13.
26. Aslanyan I.R., Eremkina M.S. Methodology for studying model compositions for casting gas turbine engine blades. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2022, no. 8, pp. 28–32.
27. Aslanyan I.R., Rassokhina L.I., Ospennikova O.G. Application of a full factorial experiment in developing model compositions. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 10, pp. 20–26.
28. Kablov E.N., Demonis I.M., Deev V.V., Bondarenko O.A., Narsky A.R. Technology for removing model masses from ceramic molds for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2005, no. 3, pp. 12–14.

#### Информация об авторах

**Форостович Татьяна Леонидовна**, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Нарский Андрей Ростиславович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Битюцкая Ольга Николаевна**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Мокеев Никита Александрович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Tatyana L. Forostovich**, Head of Production Area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey R. Narsky**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Olga N. Bityutskaya**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikita A. Mokeev**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОРИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT1-00 И VT6

А.А. Ширяев<sup>1</sup>, А.А. Арисланов<sup>1</sup>, С.В. Путырский<sup>1</sup>, Н.Ф. Востриков<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.** Представлены результаты исследований структуры и физико-механических свойств пористых полуфабрикатов, изготовленных методом спекания в вакуумных печах из порошков титановых сплавов марок VT1-00 и VT6. Показано, что разработанный режим обеспечивает уровень механических свойств и степень пористости полуфабрикатов, достаточные для применения в авиационно-космической отрасли, энергетике и пищевой промышленности. Изготовлены образцы изделий из пористых полуфабрикатов титановых сплавов VT1-00 и VT6 с применением технологии высокотемпературной пайки для формирования неразъемных соединений.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, пористые полуфабрикаты, термическая обработка, микроструктура, рентгеновская компьютерная томография, механические свойства

**Для цитирования:** Ширяев А.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Востриков Н.Ф. Опыт применения отходов аддитивного производства при изготовлении пористых полуфабрикатов из титановых сплавов VT1-00 и VT6 // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27.

Scientific article

## EXPERIENCE OF USING ADDITIVE MANUFACTURING WASTE IN THE PRODUCTION OF POROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOYS VT1-00 AND VT6

A.A. Shiryayev<sup>1</sup>, A.A. Arislanov<sup>1</sup>, S.V. Putyrskiy<sup>1</sup>, N.F. Vostrikov<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.** The article presents the results of studies of the structure and physical and mechanical properties of porous half-blanks manufactured by sintering in vacuum furnaces from powder of VT1-00 and VT6 titanium alloys. It is shown that the designed mode provides the level of mechanical properties and the degree of porosity of semi-finished products sufficient for use in the aerospace industry, energy and food industries. Samples of products were manufactured from porous semi-finished products of titanium alloys VT1-00 and VT6 using high-temperature soldering technology to form permanent joints.

**Keywords:** titanium alloys, cellular semi-finished products, heat treatment, microstructure, X-ray computed tomography, mechanical properties

**For citation:** Shiryayev A.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Vostrikov N.F. Experience of using additive manufacturing waste in the production of porous semi-finished products from titanium alloys VT1-00 and VT6. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27.

### Введение

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес к пористым металлам и пенометаллам, которые, помимо своей низкой массы, обусловленной высокой пористостью, обладают рядом преимуществ по технологическим свойствам и возможностям применения [1, 2].

В общем виде пористый металл – это металлическая пена из технически чистых металлов или сплавов либо ячеистая структура, содержащая большое количество равномерно распределенных по объему пор, заполненных газом, и перемычек из металла. При этом пористость может быть как открытого, так и закрытого типа, что определяет физико-механические и эксплуатационные свойства пористого металла, а также области его применения. Характер распределения пористости, форма и объемная доля пор и плотность материала во многом взаимосвязаны с типом сырья и применяемой технологией изготовления пористого металла.

Потенциал и области применения пенометаллов на основе различных металлов необычайно широки и разнообразны, что обусловлено возможностью управления комплексом их характеристик. В зависимости от своей структуры и конфигурации пор пенометалл по сравнению с деформированным полуфабрикатом имеет крайне низкую регулируемую плотность и может обладать высоким уровнем удельных механических свойств, а также высокой демпфирующей способностью и шумопоглощением, низкой тепло- и электропроводностью [1]. Пористые металлы имеют большие перспективы применения в качестве материалов конструкционного и функционального назначения в авиационно-космической и военной промышленности, пищевой отрасли, строительстве, автомобилестроении и медицине [3] для изготовления фильтров для очистки бытовой воды, промышленных стоков, газов и аэраторов различного назначения, сэндвич-панелей для обшивки пола, перегородок, тепло-, шумо- и вибропоглощающих панелей, амортизирующих элементов для гашения энергии [4], электродов для вторичных аккумуляторов и топливных элементов, теплообменников, биосовместимых медицинских имплантатов [5–7].

Существует несколько наиболее распространенных технологий изготовления пенометаллов [8], в том числе посредством спекания металлопорошковых композиций с применением порообразующих веществ или без него [9–11], горячего изостатического прессования (ГИП) порошковых композиций [12], вспенивания металлического расплава в жидком виде газом [13] и других менее распространенных способов [14–17].

Известно, что в процессе изготовления порошков из титановых сплавов для аддитивного производства образуется большое количество отходов в виде отсева нецелевых фракций. Вовлечение порошков титановых сплавов нецелевых фракций в производственные процессы невозможно ввиду повышенного содержания кислорода в полученных слитках вторичного производства, содержащих в своем составе металлопорошковые композиции. Отсутствует также техническая возможность сухого прессования компактированных электродов и технологий их последующей переработки на плавильном и литейном оборудовании, используемом для выплавки слитков.

Таким образом, возможность использования нецелевых фракций порошков для переработки является актуальной и важной задачей. Однако данный тип отходов может применяться при изготовлении пористых полуфабрикатов из титановых сплавов по некоторым применяемым в промышленности технологиям.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [18].

### Материалы и методы

Исследования проведены на металлопорошковых монокомпозициях из титановых сплавов марок ВТ1-00 ( $Mo_{\text{экв}} = 0$ ; фракция 100–200 мкм) и ВТ6 ( $Mo_{\text{экв}} = 3,2$  [19]; фракции 63–100 или 100–200 мкм), являющихся побочным продуктом аддитивного производства и полученных методом индукционной плавки исходных заготовок в инертной среде и газовой атомизации (распыление расплава потоком аргона). Химический состав сплавов соответствует требованиям ОСТ 1 90013–81.

Изготовление пористых полуфабрикатов проводили путем спекания металлопорошковых композиций по экспериментальным режимам в вакуумной печи сопротивления. Механические свойства определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.503–97 на универсальных испытательных машинах. Ударную вязкость определяли по ГОСТ 9454–78. Определение плотности проводили методом обмера и взвешивания по ГОСТ 20018–74.

В данной работе пористость рассчитана по формуле  $P = (1 - \rho_v/\rho_t)100 \%$ , где  $\rho_t$  – истинная плотность материала (справочные значения);  $\rho_v$  – измеренная плотность пористого полуфабриката.

Образцы для исследования микроструктуры изготавливали по стандартной методике (ПН 1.2.785–2009). Травление полированных микрошлифов осуществляли в реактиве на водной основе с содержанием 5 % (объемн.) фтористоводородной кислоты (HF) и 15 % (объемн.) азотной кислоты ( $HNO_3$ ).

Анализ микроструктуры методом оптической металлографии проводили в соответствии с ПН 1.2.785–2009 визуально на травленых микрошлифах на металлографическом микроскопе. Травление микрошлифов осуществляли в том же растворе. Анализ методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) проводили с применением сканирующего электронного микроскопа.

Исследования образцов, а также построение трехмерных изображений, проведены методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) путем сбора проекционных изображений на рентгеновском томографе с использованием специализированного программного обеспечения.

Металлографический анализ проводили методом РЭМ при увеличениях  $\times 1000$  и  $\times 5000$ .

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

### Результаты и обсуждение

С целью оценки применимости отсева нецелевых фракций (63–100 и 100–200 мкм) металлопорошковых монокомпозиций преимущественно сферической формы из титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6 (отходов аддитивного производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) для изготовления пористых полуфабрикатов проведен анализ используемых в отрасли технологий и предъявляемых требований к исходному сырью.

В результате анализа научно-технических источников информации (научных статей, патентов, отчетов) установлено, что применительно к данному сырью и технологическим возможностям оборудования НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ возможна реализация следующих способов изготовления пористых полуфабрикатов (рис. 1):

- спекание под давлением в установках ГИП [20];
- спекание в вакуумных печах (в том числе в смеси с порообразующими веществами);
- предварительное компактирование путем холодной обработки давлением с дальнейшим спеканием в вакуумных печах.

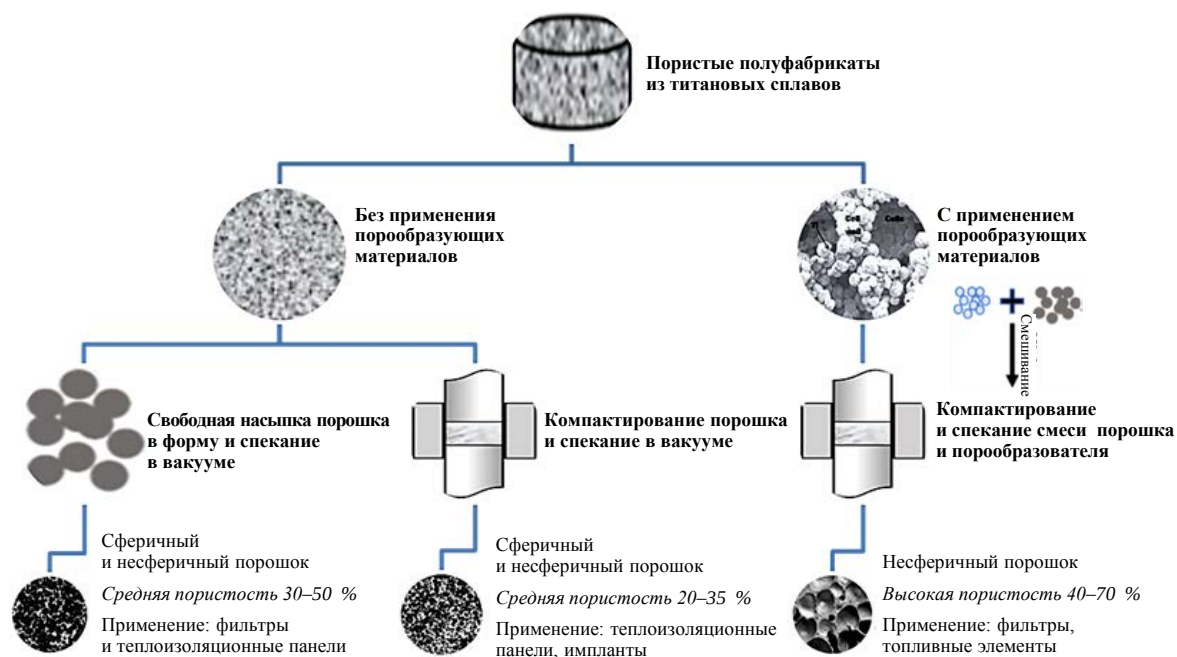


Рис. 1. Классификация технологических подходов, доступных для реализации в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

С целью оценки применимости выбранных методов для изготовления пористых полуфабрикатов проведены предварительные исследования влияния экспериментальных режимов изготовления на физико-механические свойства одной из металлопорошковых монокомпозиций (сплав ВТ6 фракции 100–200 мкм). Экспериментальные режимы изготовления пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные режимы изготовления пористых полуфабрикатов из титанового сплава марки ВТ6 (порошок фракции 100–200 мкм)

| Условный номер режима | Метод получения                    | Технологические параметры*                                              | Технологические особенности                                                                                                                                  |
|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                     | Спекание                           | Выдержка при $T_{п.п} + 120$ °C в течение $t_2$                         | —                                                                                                                                                            |
| 2                     |                                    | Выдержка при $T_{п.п} + 20$ °C в течение $t_2$                          | Гранулы легко истираются, вымываются и выкрашиваются                                                                                                         |
| 3                     |                                    | Выдержка при $T_{п.п} + 120$ °C в течение $t_1$                         |                                                                                                                                                              |
| 4                     |                                    | Выдержка при $T_{п.п} + 220$ °C в течение $t_2$                         | —                                                                                                                                                            |
| 5                     | Компактирование и спекание         | Компактирование методом прессования с последующим спеканием по режиму 2 | Сложности с прессованием сферичного порошка, который плохо уплотняется; сцепление гранул и диффузионная сварка слабые, капсулы имеют склонность к разрушению |
| 6                     | Горячее изостатическое прессование | Выдержка при $T_{п.п} - 5$ °C и давлении                                | —                                                                                                                                                            |

\*  $T_{п.п}$  – температура полиморфного превращения;  $t_1$  и  $t_2$  – продолжительности спекания ( $t_1 < t_2$ ).

Процесс спекания в вакуумной печи сопротивления осуществлен посредством свободной насыпки порошка без утрамбовывания в титановые контейнеры или графитовые тигли.

Физико-механические свойства образцов из пористых полуфабрикатов, изготовленных по некоторым из представленных в табл. 1 технологиям и режимам, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-механические свойства (средние значения) пористых полуфабрикатов  
из титанового сплава марки ВТ6 (порошок фракции 100–200 мкм)**

| Условный номер режима                    | Физические свойства          |               | Механические свойства при температуре 20 °С |                                      |                                  |                                           |                                          |
|------------------------------------------|------------------------------|---------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
|                                          | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Пористость, % | Модуль упругости при растяжении, ГПа        | Предел прочности при растяжении, МПа | Модуль упругости при сжатии, ГПа | Условный предел текучести при сжатии, МПа | Ударная вязкость КСЧ, Дж/см <sup>2</sup> |
| 1                                        | 2,66                         | 40            | 15                                          | 40                                   | 17                               | 58                                        | 0,5                                      |
| 2                                        | 2,61                         | 41            | –                                           | –                                    | 9,3                              | 40                                        | –                                        |
| 6                                        | 4,36                         | 2             | –                                           | –                                    | 126                              | 980                                       | 58                                       |
| Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ | 4,43                         | 0             | 120                                         | 950                                  | –                                | 900                                       | 30–50                                    |

Анализ плотности экспериментальных образцов из сплава ВТ6 показал, что значения плотности и пористости несущественно зависят от температуры и продолжительности спекания в исследованных диапазонах. Однако при спекании при температурах <1100 °С формируется недостаточно прочная связь между гранулами, что приводит к выкрашиванию частиц порошка при последующей механической обработке пористых полуфабрикатов. Предварительное прессование порошка в контейнере (режим 5, по сравнению с режимом 2) незначительно повышает плотность (с 2,61 до 2,89 г/см<sup>3</sup>) и уменьшает пористость (с 41 до 35 %) образца, при этом также несущественно снижается склонность к выкрашиванию гранул при механической обработке полуфабрикатов. По-видимому, это связано с тем, что гранулы сферической формы имеют (по сравнению с несферической) небольшую площадь контакта, которая не может быть существенно увеличена путем их перераспределения в объеме или локальной пластической деформации «вхолодную». В свою очередь, увеличение давления прессования приводит к разрушению контейнера, при этом существенного улучшения эффективности компактирования порошка не происходит вследствие сферической формы гранул (компактированные заготовки расслаиваются и рассыпаются).

Для пористых полуфабрикатов, спеченных по режиму 1, характерен невысокий уровень механических свойств, но достаточный для проведения механической обработки на станках, предназначенных для обработки титана, и изготовления различных изделий из них.

Применение ГИП с нагревом вблизи температуры полиморфного превращения (режим 6) приводит к существенному увеличению плотности и снижению значения пористости практически до уровня деформированного полуфабриката [21], что не отвечает задачам, поставленным в рамках данного исследования. Уровень механических свойств также близок к уровню свойств деформированного полуфабриката.

По результатам анализа физико-механических свойств показано, что среди исследованных в данной работе способов наилучший уровень плотности и пористости для планируемых сфер применения обеспечивают технологии спекания в вакуумной печи (без применения порообразующих веществ) свободно насыпанного порошка, а также компактирование методами обработки металлов давлением с последующим спеканием (режим 5). Вследствие меньшей трудоемкости для последующих исследований выбрана технология спекания по режиму 1. Отказ от применения порообразующих веществ позволит существенно сократить загрязнение внутripечного пространства, обеспечить приемлемый уровень вакуумной гигиены и возможность применения одного и того же термического оборудования как для спекания порошков, так и для вакуумной термической обработки деформированных полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов.

На образце пористого полуфабриката из сплава ВТ6, изготовленного по выбранному режиму спекания, методом РКТ проведены исследования внутренней структуры. По результатам анализа трехмерных изображений образца не обнаружено внутренних дефектов в виде пустот, несплошностей и инородных включений. Выбранный режим спекания пористого полуфабриката из сплава ВТ6 (фракция 100–200 мкм) обеспечивает необходимую прочность диффузионной связи гранул и может применяться для порошка фракции 63–100 мкм, а также с корректировкой значения температуры полиморфного превращения для порошка из сплава ВТ1-00.

По выбранному в результате проведенных исследований режиму спекания в вакуумных печах сопротивления из порошков титановых сплавов ВТ1-00 (фракция 100–200 мкм) и ВТ6 (фракции 63–100 или 100–200 мкм) изготовлена партия пористых полуфабрикатов размером до 180×110×80 мм.

Микроструктура образцов, отобранных от заготовок изготовленной партии пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 (фракция порошка 100–200 мкм) и ВТ6 (фракции порошка 63–100 и 100–200 мкм), представлена гранулами (рис. 2), имеющими пластинчатую морфологию структурных составляющих, типичную для вышеуказанных сплавов [22–26]. Форма гранул варьируется от неправильной до сферической. В микроструктуре всех образцов отчетливо прослеживаются исходные гранулы, в некоторых гранулах наблюдаются поры.

Согласно исследованиям, проведенным методом РЭМ, показано, что микроструктура гранул однородная пластинчатая и состоит из колоний пластинок вторичной  $\alpha$ -фазы, разделенных  $\beta$ -прослойками. В пределах одной гранулы для сплава ВТ1-00 может наблюдаться несколько различно ориентированных  $\alpha$ -колоний. Существенных различий в микроструктуре образцов пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 фракций 63–100 или 100–200 мкм не обнаружено.

На образцах партии пористых полуфабрикатов методом РКТ проведены исследования внутренней структуры, получено и исследовано трехмерное изображение образцов для определения наличия внутренних дефектов. На рис. 3 представлено 3D-изображение образцов и профили сечения в различных направлениях. На каждом 3D-изображении продемонстрированы три секущие плоскости, пересечение которых является выбранной точкой.

Хотя отдельные поры и их форма на полученных 3D-изображениях трудно различимы, данный метод позволяет обнаружить неоднородности распределения пористости (и, соответственно, плотности) в объеме полуфабрикатов в макромасштабе (миллиметры и сантиметры) [1].

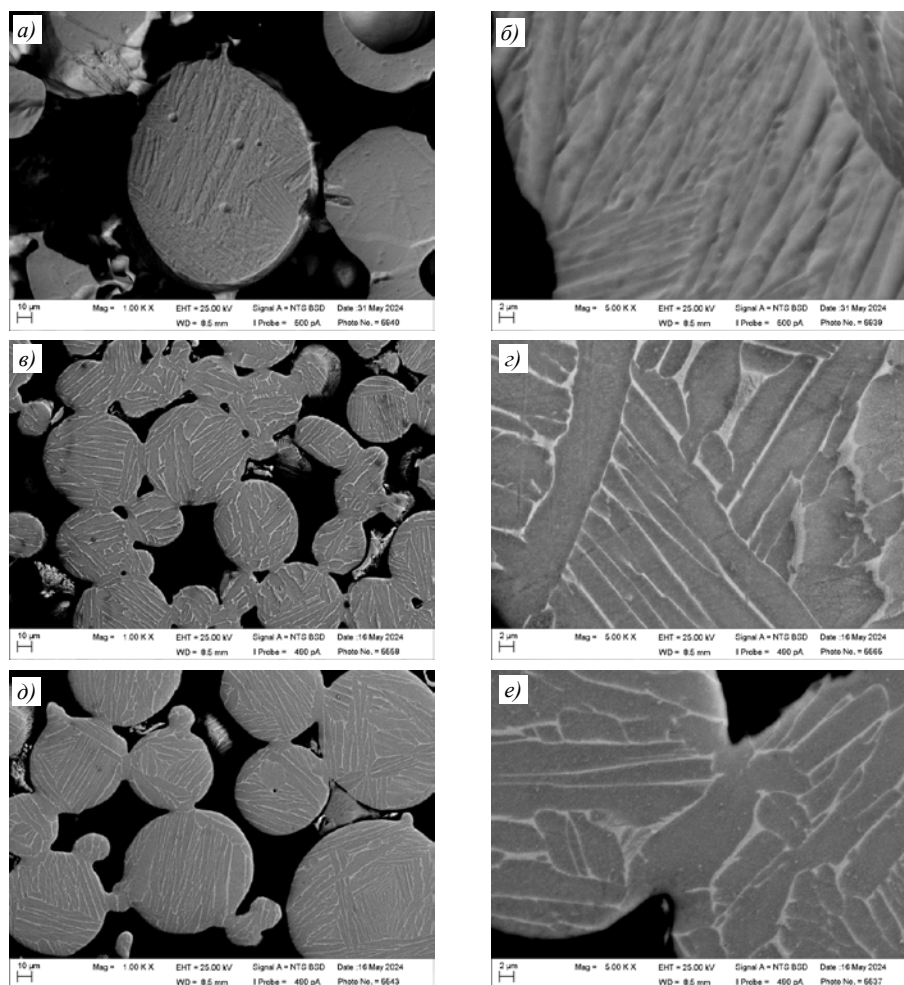


Рис. 2. Микроструктуры (РЭМ; *a, в, д* –  $\times 1000$ ; *б, з, е* –  $\times 5000$ ) пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 (*a, б*; фракция порошка 100–200 мкм) и ВТ6 с фракциями порошка 63–100 мкм (*в, з*) и 100–200 мкм (*д, е*)

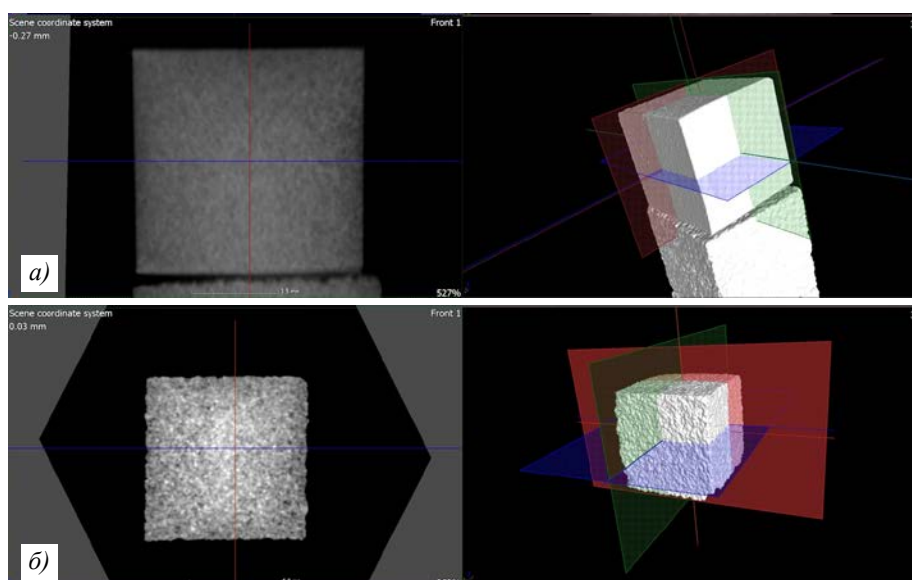


Рис. 3. 3D-изображения пористых полуфабрикатов (фракция порошков 100–200 мкм, режим спекания по нормативной документации) из титановых сплавов ВТ6 (*a*) и ВТ1-00 (*б*) и профили их сечений в различных направлениях

По результатам анализа трехмерных изображений образцов не обнаружено внутренних дефектов в виде пустот, несплошностей и инородных включений.

Результаты исследования физико-механических свойств пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6 представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Физико-механические свойства (средние значения) пористых полуфабрикатов  
из титановых сплавов марок ВТ1-00 и ВТ6, изготовленных  
по выбранному режиму спекания (режим 1)**

| Сплав<br>(фракция<br>порошка)            | Физические свойства             |                  | Механические свойства при температуре 20 °С |                                        |                                                 |                                                |
|------------------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                          | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | Пористость,<br>% | Предел прочности<br>при растяжении,<br>МПа  | Модуль упругости<br>при сжатии,<br>ГПа | Условный предел текучести<br>при сжатии,<br>МПа | Ударная вязкость<br>КСУ,<br>Дж/см <sup>2</sup> |
| ВТ1-00<br>(100–200 мкм)                  | 2,49                            | 45               | 15                                          | 6,3                                    | 12                                              | 0,4                                            |
| Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ | 4,50                            | 0                | 392                                         | 110                                    | 340                                             | 60–120                                         |
| ВТ6<br>(63–100 мкм)                      | 3,03                            | 32               | 96                                          | 23                                     | 130                                             | 0,8                                            |
| ВТ6<br>(100–200 мкм)                     | 2,69                            | 39               | 52                                          | 12                                     | 55                                              | 0,5                                            |
| Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ | 4,43                            | 0                | 950                                         | –                                      | 900                                             | 30–50                                          |

Сравнительный анализ механических свойств пористых полуфабрикатов, изготовленных из порошка сплава ВТ6 фракции 100–200 мкм по одинаковому режиму спекания (режим 1 в табл. 2 и 3), показал, что выбранный режим в целом обеспечивает получение идентичных результатов.

При изготовлении пористых полуфабрикатов в соответствии с требованиями разработанной нормативной документации из порошка сплава ВТ6 меньшей фракции (63–100 мкм) обеспечивается сниженное значение пористости, увеличенные значения плотности и всех исследованных характеристик механических свойств, что обусловлено увеличенной площадью поверхностей контакта гранул на единицу объема полуфабриката. Пористый полуфабрикат из сплава ВТ1-00 обладает повышенным уровнем пористости, более низкой плотностью, но также более низким уровнем механических свойств как в абсолютных, так и относительных величинах.

Согласно проведенному анализу физико-механических свойств изготовленных пористых полуфабрикатов из сплавов ВТ1-00 и ВТ6 разработаны технические условия.

Вследствие того, что изделия из пенометаллов зачастую характеризуются сложной формой, а при их изготовлении требуется формирование прочного неразъемного соединения, разработанные в данной работе технологические режимы спекания пористых полуфабрикатов реализованы в сочетании с высокотемпературной пайкой при изготовлении пробных изделий. Поскольку у полученных полуфабрикатов наблюдается преимущественно открытый тип пористости, одной из наиболее подходящих сфер применения являются фильтры, пламегасители, теплообменники и катализаторы [1].

В рамках данной работы проведен анализ сортамента выпускаемой продукции данного типа из пористых металлов и пенометаллов некоторых производителей

отрасли, в частности SaiFilter (веб-сайт [www.saifilter.com](http://www.saifilter.com)) и FilsonFilter ([www.filsonfilters.com](http://www.filsonfilters.com)), и выбраны конструкции пробных изделий для изготовления по разработанной авторами технологии спекания отходов аддитивного производства.

Помимо разработки чертежей непосредственно прототипов фильтрующих изделий, осуществлено проектирование оснастки из графита для их изготовления. Применение графита (предпочтительно конструкционного марок МПГ-6 и МПГ-7) для изготовления образцов изделий обусловлено достаточным уровнем прочности оснастки, изготовленной из него, при комнатной и повышенной температурах, ее химической инертностью и отсутствием прилипания к титану при спекании пористых полуфабрикатов в вакууме. Это обуславливает (в отличие от оснастки из титана) возможность многоразового применения оснастки из конструкционного графита при изготовлении различных по конфигурации пористых полуфабрикатов, в том числе коротких трубчатых элементов с толщиной стенки ~5 мм.

В данной работе изготавливали следующие изделия:

- картридж колонного фильтра из сплава ВТ6 (фракции 63–100 или 100–200 мкм);
- большой и малый фильтры-аэраторы из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм);
- трехслойную паяную сэндвич-панель конфигурации «лист ВТ1-0 – пористый полуфабрикат из сплава ВТ6 фракции 63–100 мкм – лист толщиной 1 мм ВТ1-0».

Фотографии образцов-изделий представлены на рис. 4.

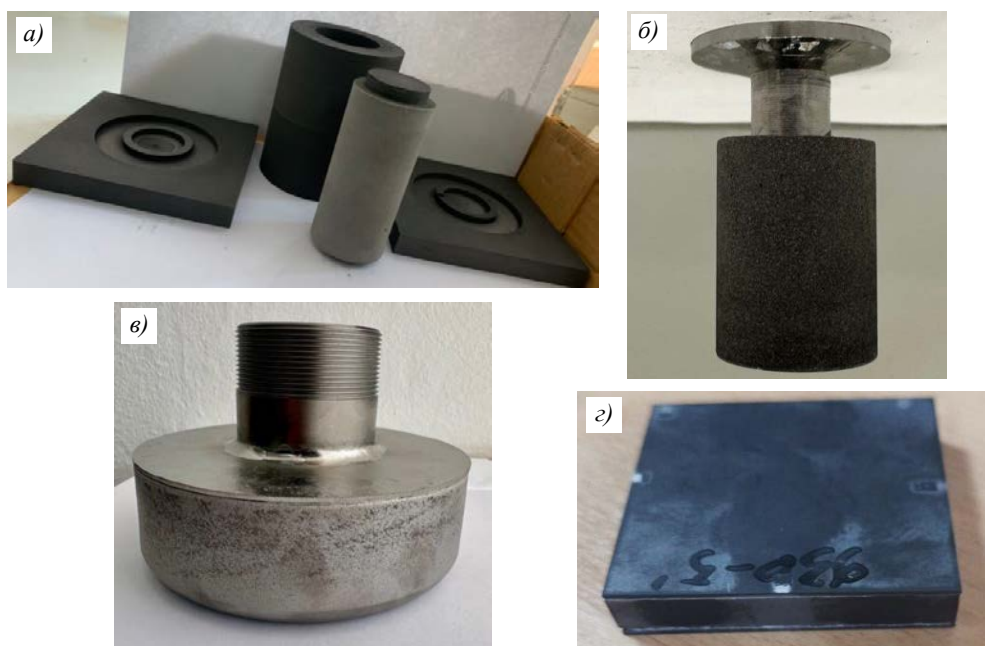


Рис. 4. Внешний вид вспомогательной графитовой оснастки и образцов-изделий (фильтры, аэраторы, сэндвич-панели), изготовленных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: а – пористый фильтрующий элемент с графитовой оснасткой картриджа колонного фильтра из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм); б, в – малый и большой фильтры-аэраторы из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм); г – сегмент трехслойной паяной сэндвич-панели

Пористые элементы фильтров изготовлены посредством спекания по разработанным режимам в вакуумной печи в графитовой оснастке с последующей механической обработкой (при необходимости). Корпусные элементы образцов-изделий изготовлены путем механической обработки заготовок из титанового сплава ВТ1-0. Соединение корпусных элементов и пористых заготовок большого фильтра-

аэратора осуществлено посредством пайки (работы по отработке технологии пайки выполнены А.Н. Афанасьевым-Ходыкиным) с применением ленты порошкового припоя ВПр16 толщиной 0,5 мм по экспериментальным режимам [27, 28]. Применение припоя данной марки позволяет получать паяные соединения титановых сплавов с высокой коррозионной стойкостью (практически на уровне соединяемых сплавов), работоспособные до температуры 500 °С.

Микроструктура паяного соединения по выбранному в результате исследований режиму представлена на рис. 5.

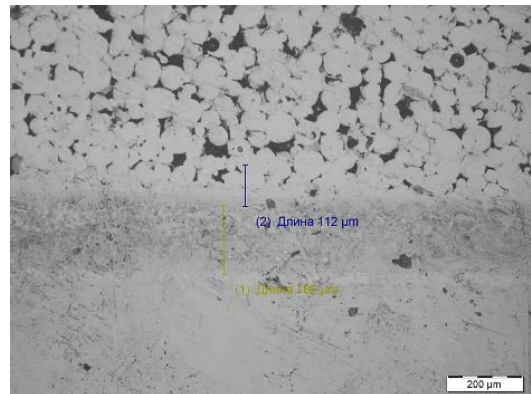


Рис. 5. Микроструктура паяного соединения пористого полуфабриката из порошка сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм). Припой ВПр16 толщиной 0,5 мм. Пайка при температуре  $T_{п.п} - 50\text{ °С}$  в течение  $t_0$

Анализ микроструктуры показал, что припой при выбранной температуре обладает оптимальной жидкотекучестью, хорошо смачивает поверхность пористого материала и подложку из деформированного полуфабриката из титанового сплава ВТ1-00. При этом припой преимущественно остается в паяемом зазоре, что благоприятно сказывается на качестве и свойствах соединения.

Аналогичным методом изготовлен сегмент трехслойной сэндвич-панели конфигурации «лист толщиной 1 мм из сплава ВТ1-0 + пористый полуфабрикат толщиной 10 мм из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм) + лист толщиной 1 мм из сплава ВТ1-0». Сэндвич-панели аналогичной конфигурации (как с открытым, так и с закрытым типом пористости), как правило, применяют в авиакосмической отрасли в качестве панелей различного назначения, в том числе в качестве вибро-звукоизоляционных панелей и облегченных, но более эффективных теплоизоляционных противопожарных перегородок (рис. 4, з).

### Заключения

Исследованы структура, в том числе посредством РКТ, и физико-механические свойства пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6, изготовленных по различным технологиям и экспериментальным режимам.

По результатам проведенных исследований и с учетом взаимосвязи характера процессов спекания титановых металлопорошковых композиций с температурой полиморфного превращения разработаны технология и режим изготовления пористых полуфабрикатов из порошков нецелевых фракций титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6, являющихся отходами аддитивного производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Показано, что разработанный режим спекания обеспечивает уровень механических свойств и степень пористости полученных полуфабрикатов,

необходимые для применения в авиационно-космической отрасли, энергетике и пищевой промышленности.

Проведен анализ сортамента выпускаемой продукции из пористых металлов и пенометаллов ряда производителей отрасли (в частности, SaiFilter и FilsonFilter), выбранны конструкции экспериментальных изделий и изготовлены образцы изделий (фильтры, аэраторы, сэндвич-панели) из пористых полуфабрикатов титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6, в том числе в соединении с листами из титановых сплавов с применением технологии высокотемпературной пайки для формирования неразъемных соединений.

#### **Список источников**

1. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46. P. 559–632.
2. Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2015. № 3–4. С. 60–65.
3. Cabezas-Villa J.L., Olmos L., Bouvard D. et al. Processing and properties of highly porous Ti6Al4V mimicking human bones // *Journal of Materials Research*. 2018. Vol. 33. P. 650–661. DOI: 10.1557/jmr.2018.35.
4. Tang E., Zhang X., Han Y. Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (5). P. 4620–4630.
5. Valanezhad A., Savabi O., Nejatidanesh F. et al. The Effect of Vacuum Leak Rate on Sintering of Porous Titanium Scaffold // *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*. 2019. Vol. 17. P. 184–188. DOI: 10.1380/ejssnt.2019.184.
6. Oh I.-H., Nomura N., Hanada S. Microstructures and Mechanical Properties of Porous Titanium Compacts Prepared by Powder Sintering // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 3. P. 443–446.
7. Kato K., Yamamoto A., Ochiai S. et al. Cell Proliferation, Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Novel Titanium Foam with Sheet Shape // *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53. No. 4. P. 724–732.
8. Parveez B., Jamal N.A., Anuar H. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15. Art. 5302. DOI: 10.3390/ma15155302.
9. Jain H., Mondal D.P., Gupta G. et al. Microstructure and high temperature compressive deformation in lightweight open cell titanium foam // *Manufacturing Letters*. 2021. Vol. 27. P. 67–71.
10. Jha N., Mondal D.P., Majumdar J.D. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route // *Materials and Design*. 2013. Vol. 47. P. 810–819.
11. Ye B., Dunand D.C. Titanium foams produced by solid-state replication of NaCl powders // *Materials Science and Engineering A*. 2010. Vol. 528. P. 691–697.
12. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Zhang D., Gordo E. Modification of Sintered Titanium Alloys by Hot Isostatic Pressing // *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 520. P. 63–69.
13. Nakamura T., Gnyloskurenko S.V., Sakamoto K. et al. Development of New Foaming Agent for Metal Foam // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 5. P. 1191–1196.
14. Yue X.-Z., Matsuo K., Kitazono K. Compressive Behavior of Open-Cell Titanium Foams with Different Unit Cell Geometries // *Materials Transactions*. 2017. Vol. 58. No. 11. P. 1587–1592.
15. Yue X.-Z., Fukazawa H., Maruyama K. et al. Effect of Post Heat Treatment on the Mechanical Properties of Porous Ti–6Al–4V Alloys Manufactured through Powder Bed Fusion Process // *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 74–79.
16. Nakajima H. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores // *Proceedings of Japan Academy, Series B*. 2010. Vol. 86. No. 9. P. 884–899.

17. Li J.P., Li S.H., Van Blitterswijk C.A., de Groot K. A novel porous Ti6Al4V: Characterization and cell attachment // *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*. 2005. Vol. 73A. Is. 2. P. 223–233. DOI: 10.1002/jbm.a.30278.
18. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
19. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
20. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications / Ed. C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, 2003. 513 p.
21. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлообработка. 2015. № 4 (88). С. 56–60.
22. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
23. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
25. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
26. Путырский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ47 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
27. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № SP2. С. 79–87.
28. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.

### References

1. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, pp. 559–632.
2. Khokhlov M.A., Ishchenko D.A. Structural ultra-light porous metals (review). *Avtomaticeskaya svarka*, 2015, no. 3–4, pp. 60–65.
3. Cabezas-Villa J.L., Olmos L., Bouvard D. et al. Processing and properties of highly porous Ti6Al4V mimicking human bones. *Journal of Materials Research*, 2018, vol. 33, pp. 650–661. DOI: 10.1557/jmr.2018.35.
4. Tang E., Zhang X., Han Y. Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8 (5), pp. 4620–4630.

5. Valanezhad A., Savabi O., Nejatidanesh F. et al. The Effect of Vacuum Leak Rate on Sintering of Porous Titanium Scaffold. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 2019, vol. 17, pp. 184–188. DOI: 10.1380/ejssnt.2019.184.
6. Oh I.-H., Nomura N., Hanada S. Microstructures and Mechanical Properties of Porous Titanium Compacts Prepared by Powder Sintering. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 3, pp. 443–446.
7. Kato K., Yamamoto A., Ochiai S. et al. Cell Proliferation, Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Novel Titanium Foam with Sheet Shape. *Materials Transactions*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 724–732.
8. Parveez B., Jamal N.A., Anuar H. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review. *Materials*, 2022, vol. 15, art. 5302. DOI: 10.3390/ma15155302.
9. Jain H., Mondal D.P., Gupta G. et al. Microstructure and high temperature compressive deformation in lightweight open cell titanium foam. *Manufacturing Letters*, 2021, vol. 27, pp. 67–71.
10. Jha N., Mondal D.P., Majumdar J.D. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. *Materials and Design*, 2013, vol. 47, pp. 810–819.
11. Ye B., Dunand D.C. Titanium foams produced by solid-state replication of NaCl powders. *Materials Science and Engineering A*, 2010, vol. 528, pp. 691–697.
12. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Zhang D., Gordo E. Modification of Sintered Titanium Alloys by Hot Isostatic Pressing. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 520, pp. 63–69.
13. Nakamura T., Gnyloskurenko S.V., Sakamoto K. et al. Development of New Foaming Agent for Metal Foam. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 5, pp. 1191–1196.
14. Yue X.-Z., Matsuo K., Kitazono K. Compressive Behavior of Open-Cell Titanium Foams with Different Unit Cell Geometries. *Materials Transactions*, 2017, vol. 58, no. 11, pp. 1587–1592.
15. Yue X.-Z., Fukazawa H., Maruyama K. et al. Effect of Post Heat Treatment on the Mechanical Properties of Porous Ti–6Al–4V Alloys Manufactured through Powder Bed Fusion Process. *Materials Transactions*, 2019, vol. 60, no. 1, pp. 74–79.
16. Nakajima H. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores. *Proceedings of Japan Academy, Series B*, 2010, vol. 86, no. 9, pp. 884–899.
17. Li J.P., Li S.H., Van Blitterswijk C.A., de Groot K. A novel porous Ti6Al4V: Characterization and cell attachment. *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*, 2005, vol. 73A, is. 2, pp. 223–233. DOI: 10.1002/jbm.a.30278.
18. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft construction and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
19. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference book*. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
20. *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Ed. C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, 2003, 513 p.
21. Ageev S.V., Gurshov V.L. Hot isostatic pressing in powder matallurgy. *Metallrobrabotka*, 2015, no. 4 (88), pp. 56–60.
22. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of titanium-based alloys and its intermetallics: tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
23. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrsky S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of VT6ch titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.

25. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
26. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
27. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanasyev-Khodykin A.N. Study of finely dispersed solder powders for diffusion vacuum brazing obtained by melt atomization. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 79–87.
28. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Welding and brazing in the aerospace industry. *Reports All-Russian scientific-practical conf. «Welding and Safety»*. Yakutsk: IPTPS SB RAS, 2012, pp.21–30.

#### Информация об авторах

**Ширяев Андрей Александрович**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Арисланов Аскаджон Абдурасулович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Путырский Станислав Владимирович**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Востриков Никита Федорович**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Andrey A. Shiryaev**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Askadzhon A. Arislanov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Stanislav V. Putyrskiy**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikita F. Vostrikov**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.12.2024.  
The article was submitted 28.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.12.2024.

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

M.A. 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.

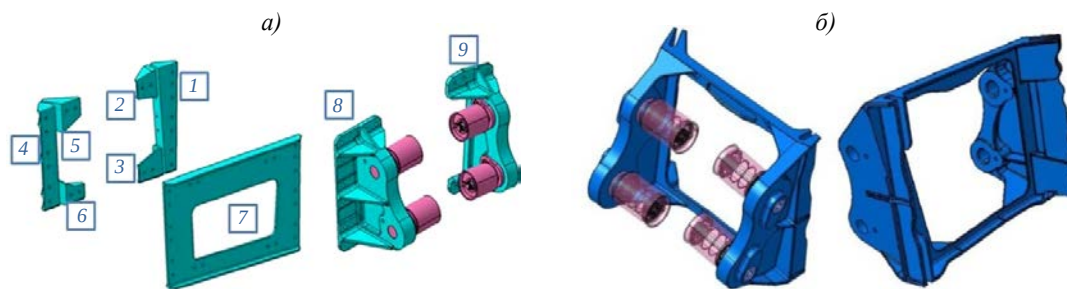


Рис. 1. 3D-модель заслонки из девяти деталей из алюминиевого сплава (а) и заслонки, отлитой из титанового сплава (б)

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.

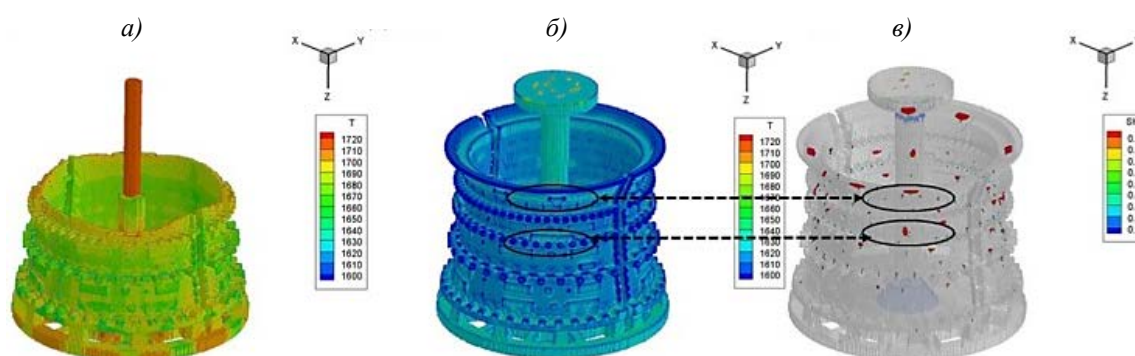


Рис. 3. Компьютерное моделирование заливки: *а* – заполнение формы расплавом металла; *б* – анализ температур при затвердевании; *в* – прогноз внутренних дефектов [11]

### 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 выплавляемые 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 MJP 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 MJP также относится применение воскоподобного материала, схожего по свойствам с модельными композициями, используемыми при традиционной технологии.

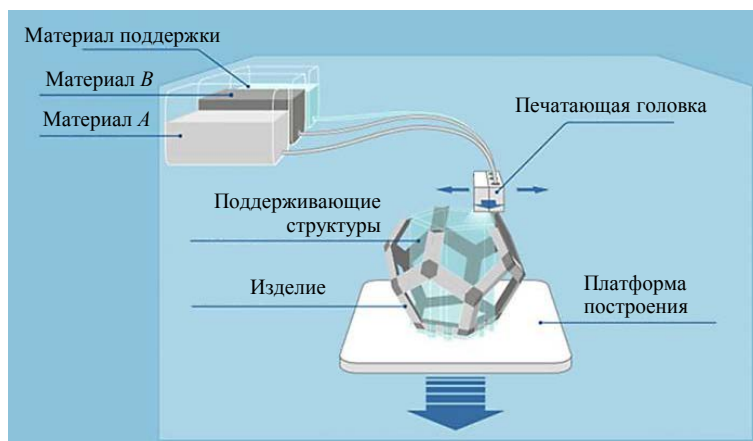


Рис. 5. Схема печати по технологии многоструйной печати (MJP)

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.

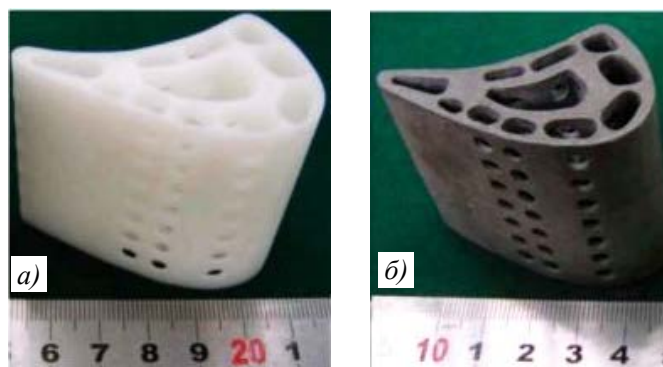


Рис. 6. Модель лопатки из фотополимерной смолы (а) и отливка лопатки, изготовленная с ее использованием (б) [14]

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».

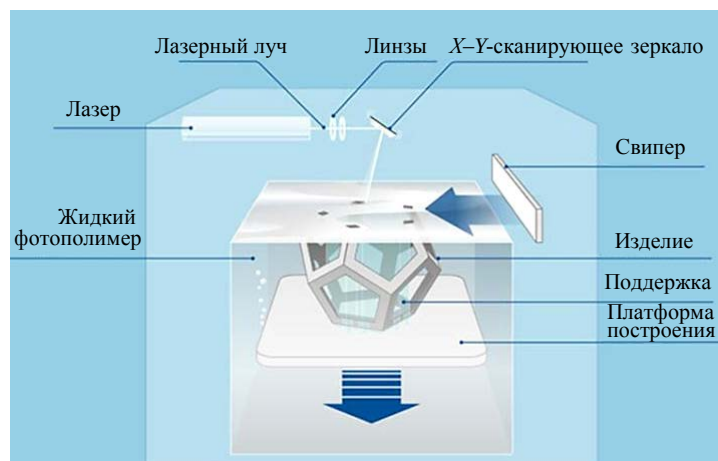


Рис. 7. Схема печати по технологии стереолитографии

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].

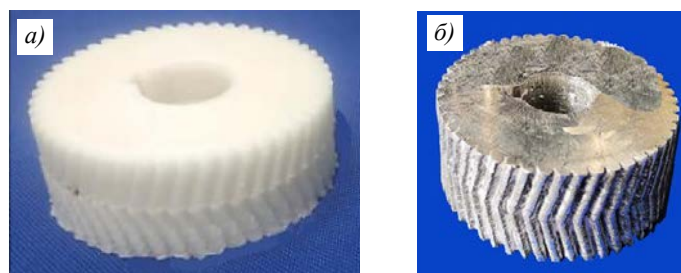


Рис. 8. Модель, изготовленная методом послойного наплавления (FDM) (а), и отливка зубчатого колеса, изготовленная с ее использованием (б) [15]

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.

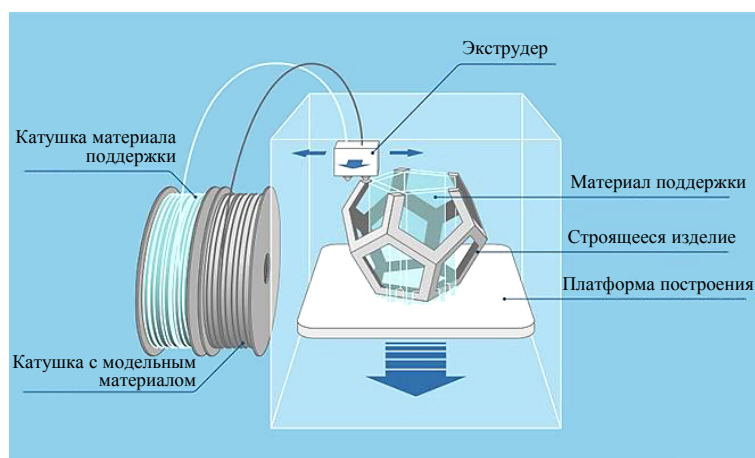


Рис. 9. Схема печати по технологии послойного наплавления (FDM)

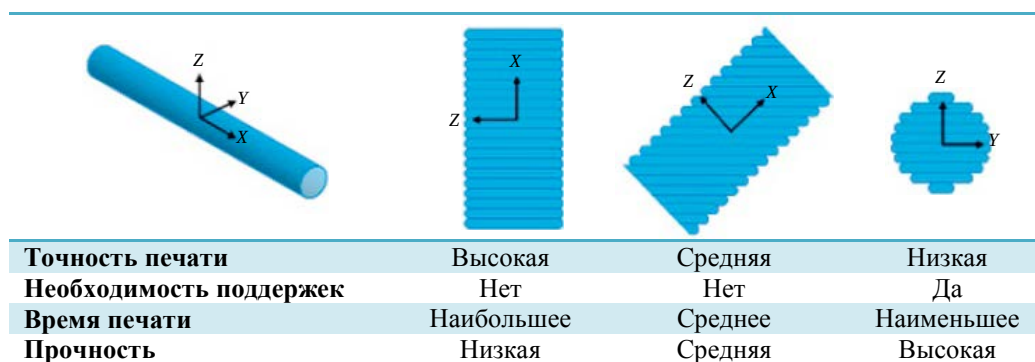


Рис. 10. Влияние расположения образца при печати методом послойного наплавления (FDM) на качество его поверхности [13]

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

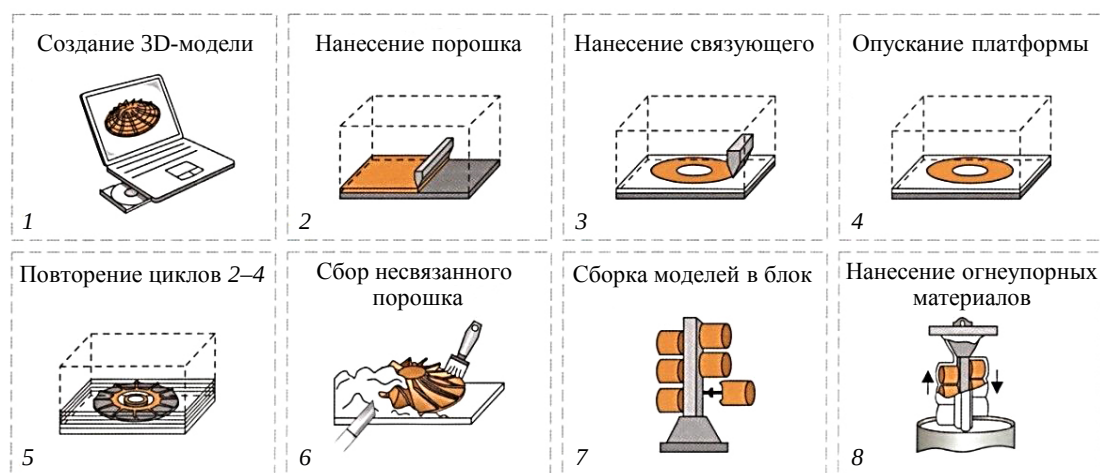


Рис. 11. Схема печати по технологии струйного нанесения (BJT)

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).

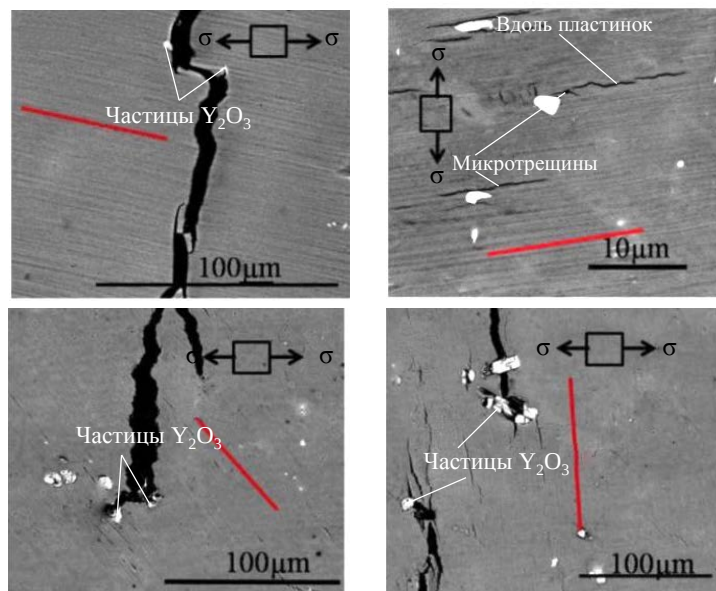


Рис. 13. Микроструктуры отливки с частицами оксида иттрия, проникшими в металл

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.

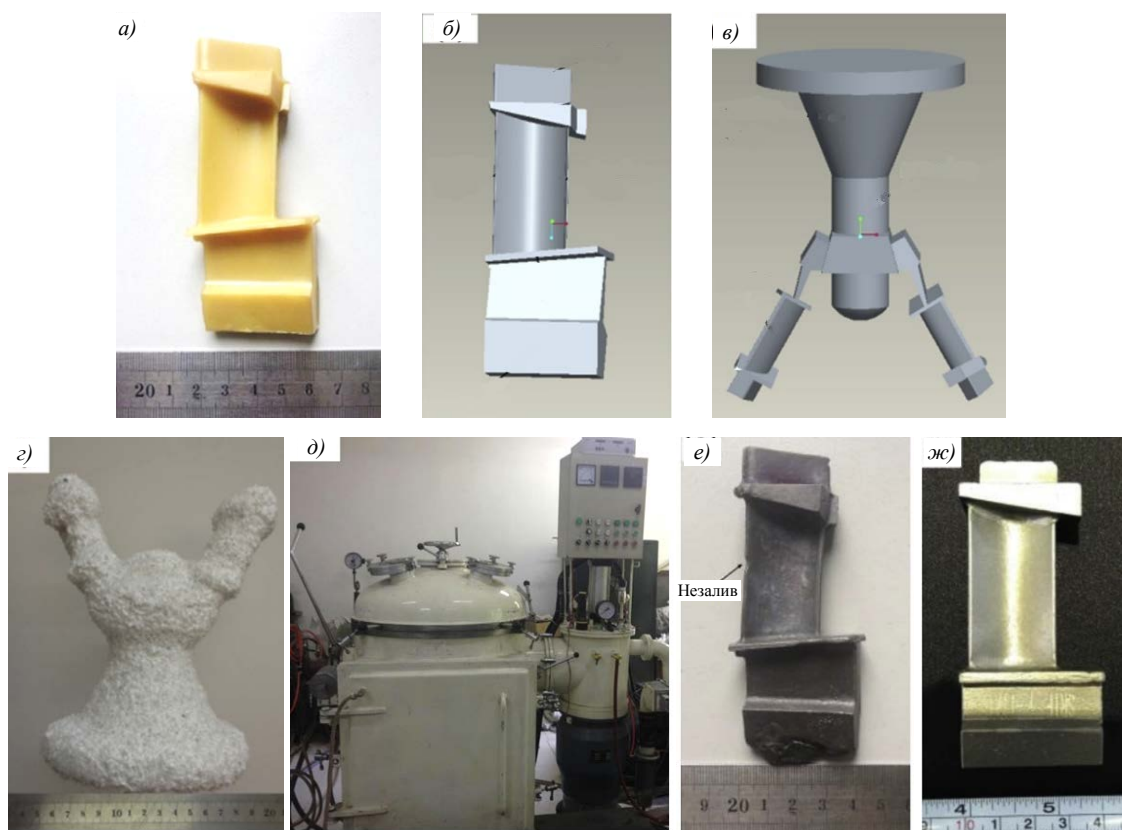


Рис. 14. Восковая модель лопатки (а); 3D-модели лопатки (б) и литниково-питающей системы (в); керамическая литейная форма (г); вакуумно-индукционная печь (д); отливки лопаток, залитые стационарно (е) и центробежно (ж) [24]

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 плавов (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).

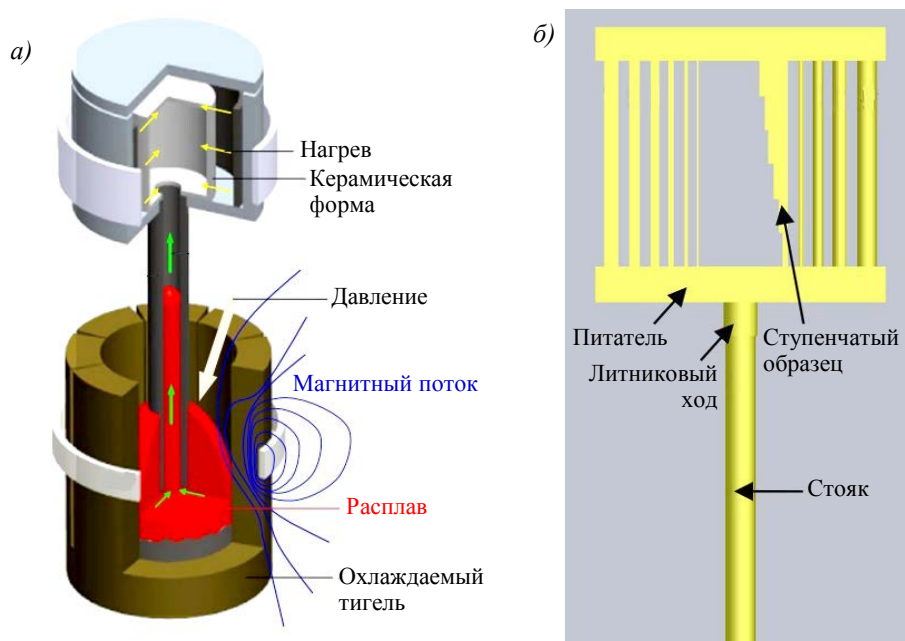


Рис. 16. Принципиальная схема реализации антигравитационного литья (а) и 3D-модель полученных образцов (б) [9]

### 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. Taao 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., Mykhniian 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. Taao 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., Mykhniy 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.

Научная статья

УДК 669.721: 621.762.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Е.Ф. Волкова<sup>1</sup>, А.А. Алиханян<sup>1</sup>, М.В. Акинина<sup>1</sup>, И.В. Мостяев<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.** Представлен обзор наиболее значимых публикаций, посвященных проблеме разработки новых технологических процессов при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов. Установлено, что наряду с изысканием экономолегированных композиций составов активно разрабатываются перспективные технологические процессы производства полуфабрикатов. Это сопровождается поиском оригинальных инженерных решений при конструировании и использовании соответствующего нестандартного оборудования.

**Ключевые слова:** деформируемые магниевые сплавы, новые технологические процессы, гнутый профиль, высокоскоростная прокатка, дисперсные интерметаллидные фазы, стойкость к воспламенению

**Для цитирования:** Волкова Е.Ф., Алиханян А.А., Акинина М.В., Мостяев И.В. Новые технологические процессы при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56.

Scientific article

## NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE PRODUCTION OF HIGH-QUALITY SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM MAGNESIUM ALLOYS

E.F. Volkova<sup>1</sup>, A.A. Alikhanyan<sup>1</sup>, M.V. Akinina<sup>1</sup>, I.V. Mostyaev<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.** The article provides an overview of the most significant publications devoted to the problem of developing new technological processes in the production of high-quality semi-finished products from magnesium alloys. It has been determined that along with the search for sparingly alloyed compositions there is an active exploration of promising technological processes for the production of semi-finished products from magnesium alloys. These actions are accompanied by the search for original engineering solutions in the design and use of appropriate non-standard equipment.

**Keywords:** wrought magnesium alloys, new technological processes, bent profile, high-speed rolling, dispersed intermetallic phases, resistance to ignition

**For citation:** Volkova E.F., Alikhanyan A.A., Akinina M.V., Mostyaev I.V. New technological processes in the production of high-quality semi-finished products from magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-42-56.

## Введение

Магниевого сплавы – наиболее легкие, в большинстве случаев экологически чистые конструкционные материалы. Они обладают большим потенциалом применения в изделиях оборонной, авиационной, транспортной, медицинской и электронной промышленности.

Как показывают результаты анализа зарубежных научно-технических публикаций по данной проблематике, интерес к магниевым сплавам в XXI в. возрастает [1–5]. Положительные перспективы применения магниевых сплавов в современных отраслях техники, в частности в авиационной, космической и оборонной промышленности, отмечаются и отечественными исследователями. Материалы для космических аппаратов должны выдерживать специфически экстремальные условия эксплуатации в космическом пространстве, а также обеспечивать стабильную работу аппарата в космосе. Основные требования к этим материалам – высокая удельная прочность и жесткость, хорошие показатели стабильности размеров [6, 7].

Для деталей, применяемых в конструкции самолетов, требуются стабильные и повышенные удельные характеристики прочности и жесткости. Материалы должны выдерживать статические и переменные нагрузки, возникающие под воздействием различных факторов, таких как взлет и посадка, маневренный полет и резкие изменения скоростного режима. Поэтому такая характеристика, как сопротивление усталости, имеет большое значение для авиационных материалов. Использование магниевых сплавов позволяет снизить расход топлива, увеличить дальность и продолжительность полета [4, 7–9].

Благодаря особым техническим характеристикам магниевые сплавы применяются в наиболее перспективной области современных электронных коммуникаций: в электронных компонентах фотокамер, телевизоров, ноутбуков, плазменных дисплеев, мобильных телефонов и др. В автомобильной промышленности магниевые сплавы широко используются при производстве серии деталей: корпусов коробки передач, приборных панелей, капотов двигателей, рам, дверей и др. [8, 9].

Хорошая биосовместимость с тканями человеческого организма и физическая стабильность изделий из магниевых сплавов в процессе эксплуатации делают их пригодными для использования в качестве медицинских имплантатов [10–13].

Широкие исследования магниевых сплавов и разработка новых технологических процессов их производства проводятся учеными и инженерами из КНР, США, Южной Кореи, Австралии, Японии и др.

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

## Результаты анализа и обсуждение публикаций

Закономерно, что технологические процессы при производстве деталей из магниевых сплавов разрабатываются в зависимости от конкретного изделия, для которого они предназначаются. В первую очередь во внимание принимаются условия эксплуатации деталей. Новые сложные технологические процессы, как правило, первоначально применяют к известным и хорошо изученным недорогим серийным сплавам.

Так, изогнутые профили сложной конфигурации из деформируемого магниевого сплава AZ31 могут найти достаточно широкое применение в деталях конструкций транспортных средств (автомобили, железнодорожные поезда, самолеты), где весовой фактор имеет решающее значение. Обычно изогнутые профили изготавливаются из прессованных полуфабрикатов с помощью операции гибки.

Поскольку магниевые сплавы обладают гексагональной плотноупакованной структурой, они характеризуются ограниченной пластичностью и формуемостью при комнатной температуре. Для проведения пластической деформации магниевых сплавов необходим нагрев заготовок и инструмента до температур не ниже 200–225 °С [9, 14, 15]. При этом используемая в настоящее время операция гибки после прессования может включать несколько технологических этапов: гибку прессом/поршневым прессом, гибку с вращательным вытягиванием и гибку с тремя валками [16–20].

Авторы работы [14] предложили оригинальную технологию изготовления изогнутых профилей из сплава AZ31 за одну операцию с помощью нового процесса поперечной экструзии с дифференциальной скоростью (differential velocity sideways extrusion – DVSE). Использован гидравлический пресс, в котором сконструированы два перпендикулярных по отношению друг к другу контейнера (рис. 1). Такой пресс создает различную величину усилия сжатия по двум направлениям (рис. 1, а).

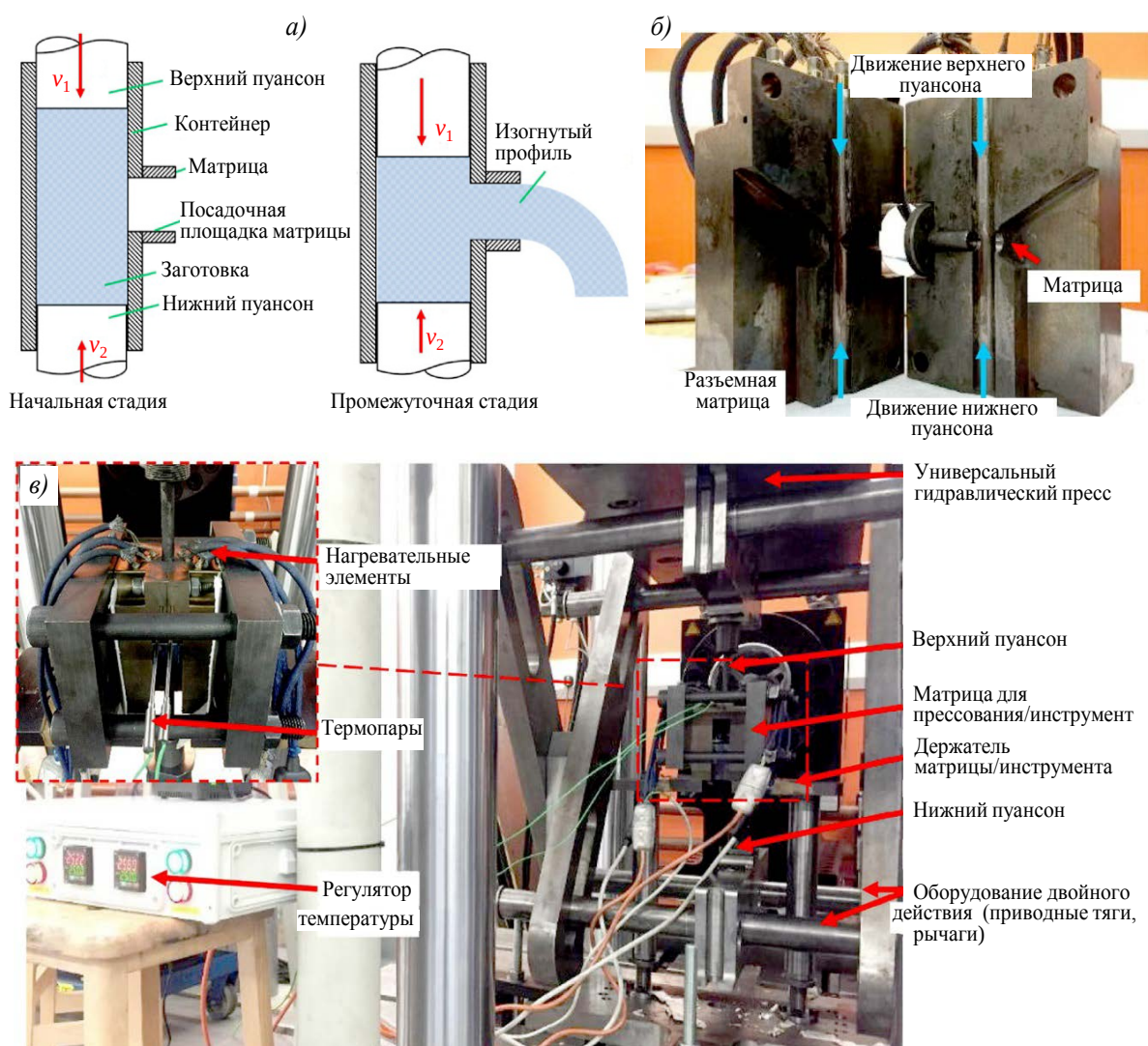


Рис. 1. Принципиальная схема процесса поперечного выдавливания/прессования с различными скоростями деформации  $v_1$  и  $v_2$  (а), разъемная матрица для прессования (экструзии) с нагревательными элементами (б) и экспериментальная установка с набором инструментов для экструзии, установленным на прессе фирмы Instron (в) [14]

Изучены влияние температуры и скорости прессования (деформации) на кривизну, изменение микроструктуры и уровень механических свойств изготавливаемых профилей. Выявлено, что в первую очередь кривизна профиля зависит от соотношения скоростей прессования нижнего ( $v_2$ ) и верхнего ( $v_1$ ) пуансона (рис. 2). Установлена корреляция между параметрами микроструктуры и механическими свойствами.

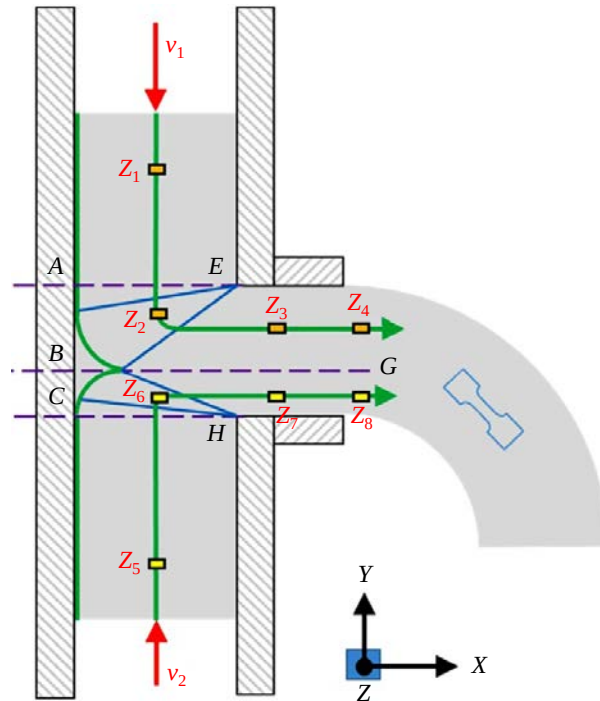


Рис. 2. Режим деформации и схема взятия проб для определения микроструктуры и механических свойств:  $v_1$ ,  $v_2$  – скорости деформации,  $Z_1$ – $Z_8$  – места отбора проб прессуемой заготовки и изогнутого профиля. Перед деформацией каждую заготовку предварительно нагревали до температуры прессования [14]

Кроме того, на величину кривизны влияет температура (250, 300 и 350 °С) и скорость прессования ( $v_1$  составляет 0,1 и 1 мм/с) при заданном первоначально соотношении скоростей  $v_2/v_1$  (рис. 3).

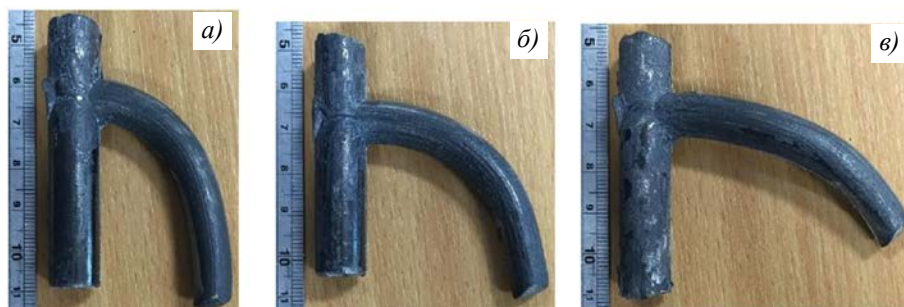


Рис. 3. Изменение кривизны изогнутого профиля при соотношениях скоростей деформации  $v_2$  и  $v_1$  1/3 (а), 1/2 (б) и 2/3 (в), при температурах 250, 300, 350 °С и скорости  $v_1$ , равной 0,1 и 1 мм/с [14]

Меньшие значения скорости применяли при температуре нагрева 250 °С ( $v_1 = 0,1$  мм/с). С повышением температуры до 300–350 °С скорость деформации  $v_1$

увеличивали до 1 мм/с. Результаты изучения микроструктуры изогнутого профиля подтвердили факт измельчения структуры в зависимости от режима деформации: размер зерна уменьшается с  $\sim 25$  мкм в исходной заготовке до  $\sim (4-7)$  мкм в изогнутом профиле (рис. 4 и 5).

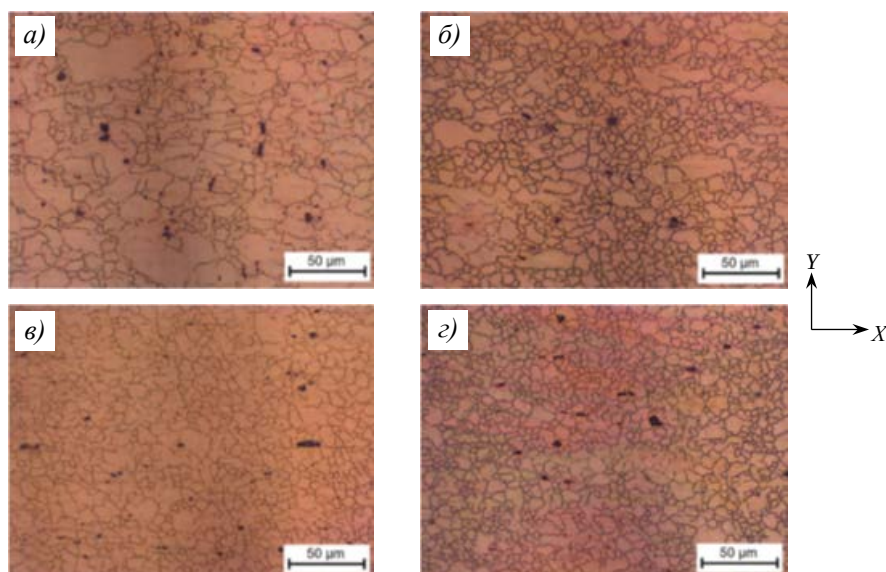


Рис. 4. Эволюция микроструктуры заготовки и изогнутого профиля вдоль линии течения в плоскости симметрии  $XY$  при температуре 300 °C и скорости 0,1 мм/с в зоне отбора проб  $Z_1$  (а),  $Z_2$  (б),  $Z_3$  (в) и  $Z_4$  (г) [14]

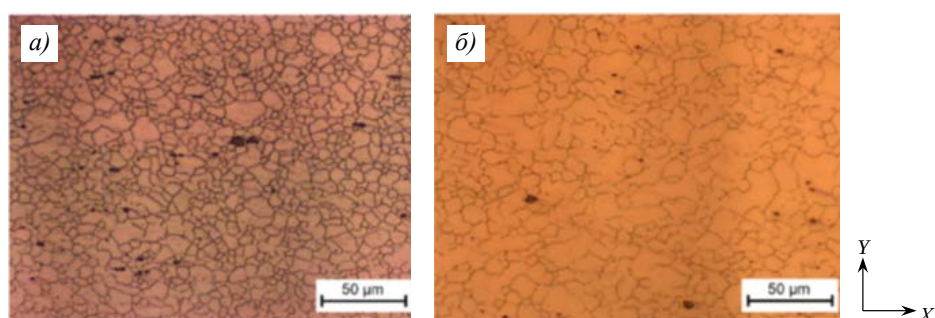


Рис. 5. Микроструктуры зоны  $Z_4$  изогнутых профилей (при соотношении скоростей деформации  $v_2/v_1 = 1/2$ ), сформированных при температуре 350 (а) и 300 °C (б) и скорости деформации  $v_1$ , равной 0,1 (а) и 1 мм/с (б) [14]

Результаты испытания величины микротвердости  $\alpha$ -твердого магниевого раствора и значения основных механических свойств профилей при растяжении (предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения) подтвердили повышение этих характеристик при определенных параметрах деформации по сравнению с исходной заготовкой. Это можно объяснить фактором измельчения зерен при прохождении частичной динамической рекристаллизации. При скорости деформации  $v_1 = 0,1$  мм/с при повышении температуры нагрева с 250 °C через каждые 50 °C до температуры нагрева 350 °C свойства изогнутого профиля изменяются. Максимальный уровень свойств определен для прутков, подвергнутых деформации при 300 °C ( $v_1 = 0,1$  мм/с). Все образцы вырезаны в области изгиба согласно рис. 2. Основные механические свойства изогнутых прутков представлены в таблице.

**Механические свойства изогнутых прутков  
при растяжении в продольном направлении [14]**

| Температура деформации, °С                                                                                                          | Предел прочности $\sigma_b$ , МПа | Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа | Относительное удлинение $\delta$ , % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 250                                                                                                                                 | 260                               | 155                                            | 15                                   |
| 300                                                                                                                                 | 278                               | 170                                            | 24                                   |
| Примечание. Изогнутые прутки получены при скорости деформации $v_1 = 0,1$ мм/с и соотношении скоростей деформации $v_2/v_1 = 1/2$ . |                                   |                                                |                                      |

Таким образом, в рассмотренной работе предложен коммерчески выгодный путь изготовления изогнутых профилей достаточно сложной конфигурации из серийного магниевого сплава AZ31 всего за одну операцию. Работы проведены в лабораторных условиях на профилях лабораторного масштаба с ограниченной длиной. Однако, по мнению авторов работы [14], технология DVSE может с успехом применяться для производства изогнутых профилей требуемых габаритов в промышленных масштабах.

Легирование редкоземельными элементами (РЗЭ) и использование традиционной термомеханической обработки позволяют существенно повысить служебные характеристики магниевых сплавов, но приводят к значительному их удорожанию [7–10, 21–26].

Авторами работы [21] разработан новый технологический процесс изготовления тонкого листа из сплава системы Mg–6Al–4Sn–1Zn (марки ATZ641). Сплав не содержит редких и дорогих металлов. Метод изготовления предусматривает совмещение двух видов деформации: прессования (экструзии) и высокоскоростной прокатки (high-speed rolling – HSR). В итоге это позволяет получить катаный лист с высоким для магниевых сплавов уровнем механических свойств при растяжении: условным пределом текучести  $\sigma_{0,2} \approx 410$  МПа, пределом прочности  $\sigma_b \approx 442$  МПа и относительным удлинением  $\delta \geq 5,1$  %.

В качестве исходного материала для исследования использованы слитки сплава ATZ641 диаметром 86 мм и длиной 100 мм. После двухступенчатой гомогенизации слитки отпрессованы в прутки диаметром 15 мм при температуре 350 °С с определенной степенью деформации и малой скоростью прессования  $\sim 1,2$  мм/с. Сплав из таких прутков получил обозначение ATZ641-350E32.

Для дальнейшего эксперимента, включающего HSR, из прутков сплава вырезаны пластины толщиной 2,1 мм и шириной 15 мм в направлении деформации.

Полученные пластины из сплава ATZ641 нагревали до температуры 300 °С в течение 15 мин, скорость прокатки составила  $\sim 1000$  м/мин, прокатку проводили без предварительного нагрева валков. Выполнено три прохода с обжатиями 10, 15 и 15 %. Между проходами заготовки нагревали при температуре 300 °С в течение 5 мин, затем подвергали охлаждению на воздухе. Сплав после HSR обозначен как ATZ641-350E32-HSR.

Микроструктуру образцов исследовали методами оптической микроскопии, автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии (FESEM) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Первоначально в структуре прессованных прутков установлено наличие выделений интерметаллидных фаз состава  $Mg_{17}Al_{12}$ ,  $Mg_2Sn$ , равномерно распределенных по границам зерен и выделяющихся во время прессования до операции HSR. Авторами работы [21] доказано, что при проведении операции HSR происходит существенное измельчение зерна (до нанодисперсных размеров). Этот процесс протекает именно на стадии деформации при HSR, что объясняется прохождением динамической рекристаллизации (рис. 6 и 7).

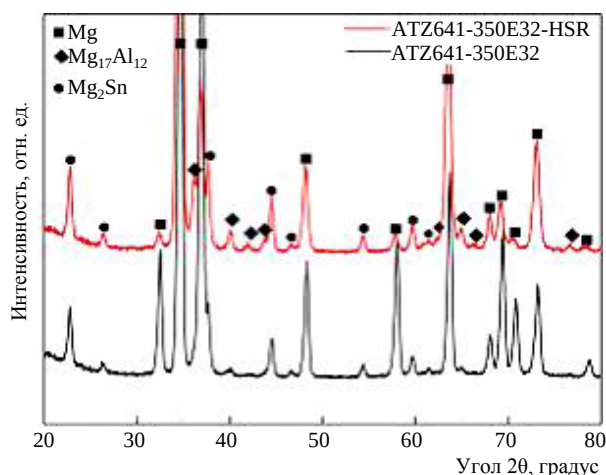


Рис. 6. Рентгенограммы сплавов ATZ641-350E32 и ATZ641-350E32-HSR [21]

На рис. 7, *a* показана оптическая микрофотография структуры сплава ATZ641-350E32 в прессованном состоянии. Результаты микроисследований подтвердили, что микроструктура сплава ATZ641-350E32 состоит из равноосных полностью динамически рекристаллизованных зерен. Средний размер зерна сплава составляет  $\sim 5,3$  мкм.

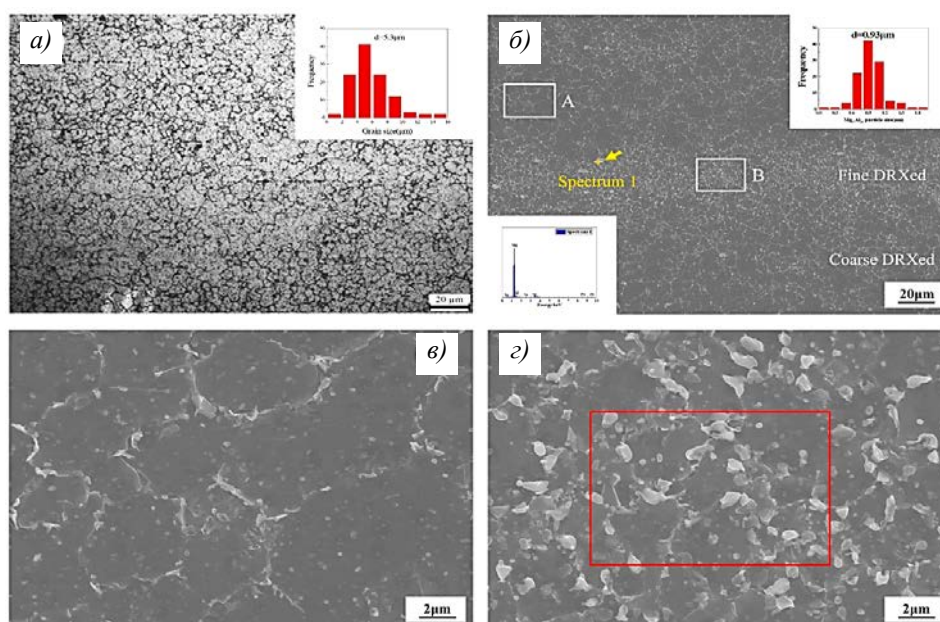


Рис. 7. Оптическая (*a*) и полученные методом FESEM (*б–г*) микрофотографии структуры сплава ATZ641-350E32 с малым (*б*) и большим увеличением (*в, г*) грубых (Coarse DRXed) (*в*) и мелких динамически рекристаллизованных областей (Fine DRXed) (*г*), отмеченных зонами А и В соответственно (*б*); выделения частиц фазы  $Mg_{17}Al_{12}$  и их достаточно однородное распределение (*г*); графики распределения зерен по размерам (*a, б*) и результаты качественного рентгеноспектрального микроанализа  $\alpha$ -твердого раствора (*б*) [21]

В то же время динамическая рекристаллизация в значительной степени стимулируется благодаря нанодисперсным выделениям указанных фаз состава  $Mg_{17}Al_{12}$  и  $Mg_2Sn$ . Эти выделения в свою очередь инициируют образование зародышей новых зерен и также способствуют формированию определенного количества субзерен. Мелкозернистая структура и нанодисперсные выделения фаз приводят к усилению механизма

скольжения, следствием чего является улучшение технологичности сплава (в частности, его прокатываемости) [21].

Кроме того, высокий уровень механических свойств объясняется не только мелкозернистым упрочнением, но и высокой плотностью остаточных дислокаций и формированием многочисленных гибридных частиц интерметаллидных фаз  $Mg_{17}Al_{12}$  и  $Mg_2Sn$ . Гибридные частицы характеризуются бимодальными размерами (микро- и нанометрическими), причем выделения частиц фазы  $Mg_{17}Al_{12}$  в основном имеют микрометрические размеры, а частицы фазы  $Mg_2Sn$  – субмикрометрические (рис. 8, а).

Это подтверждается микрофотографиями образцов, полученными методом ПЭМ в светлом поле для сплавов ATZ641-350E32 (рис. 8, б) и ATZ641-350E32-HSR (рис. 8, в). Видно также, что микроструктура сплава ATZ641-350E32 состоит из областей, свободных от дислокаций, наблюдаются лишь единичные рассеянные дислокационные линии.

Результаты анализа тонких структур и фазового состава сплавов ATZ641-350E32 и ATZ641-350E32-HSR (рис. 8, б, в) позволяют утверждать, что формирование высокой плотности частиц интерметаллидных фаз  $Mg_{17}Al_{12}$  и  $Mg_2Sn$ , образующихся как при пресовании, так и при последующей HSR, подавляет процесс динамической рекристаллизации и таким образом способствует образованию значительного количества субзерен посредством закрепления наночастиц интерметаллидных фаз, блокирующих их рост [21].

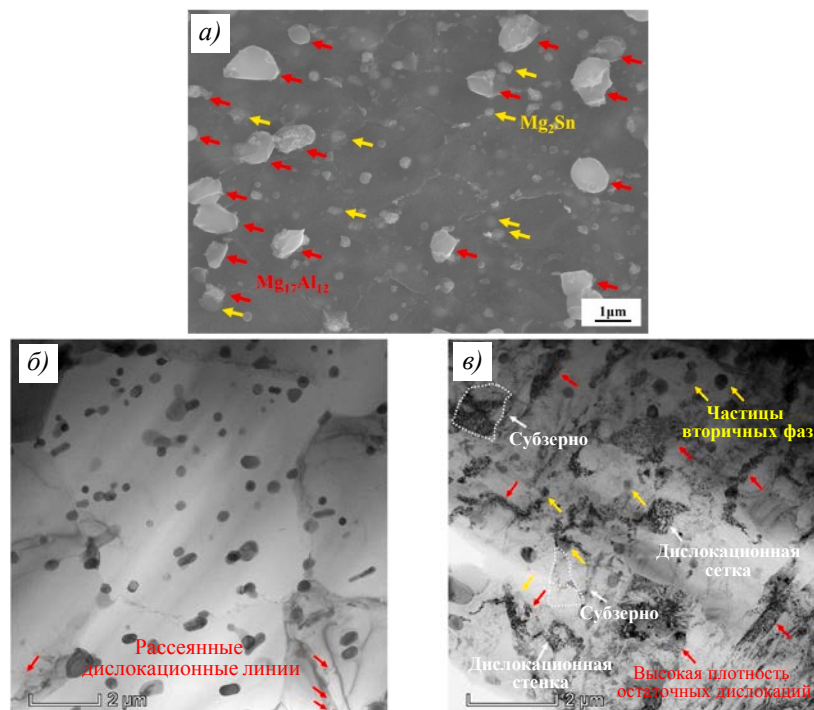


Рис. 8. Микрофотографии структуры сплавов ATZ641-350E32-HSR (а, в) и ATZ641-350E32 (б), полученные методами FESEM (а) и ПЭМ (б, в) [21]

Другим ответственным направлением развития технических и технологических возможностей деформируемых магниевых сплавов служит разработка новых составов на основе магния, которые могли бы соответствовать требованиям по воспламеняемости, предъявляемым FAA (Федеральным управлением гражданской авиации США). Подобные работы проводили также отечественные исследователи. В результате разработок деформируемый магниевый сплав марки ВМД16, содержащий РЗЭ. Этот сплав отличается хорошим сочетанием высоких механических характеристик и стойкостью к воспламенению [22–24].

За рубежом предложены сплавы марок WE43 и Elektron 21, содержащие большое количество РЗЭ в качестве легирующих компонентов. Эти сплавы достаточно успешно прошли огневые испытания. Однако в первую очередь во внимание принимается экономическая целесообразность применения подобных материалов. Поэтому дальнейшие разработки были направлены на магниевые сплавы, способные проявлять огнестойкость, но не содержащие РЗЭ либо легированные ими в минимально допустимых количествах [25–27].

В результате в фокусе внимания оказались сплавы системы Mg–Al–Ca. Выявлено, что кальций обеспечивает огнезащитный эффект, обусловленный образованием дополнительных оксидных слоев. Кроме того, кальций снижает реакционную способность магниевого расплава, что делает его обработку более безопасной и менее сложной. Сплавы, содержащие кальций, менее подвержены самовоспламенению при повышенных температурах, в частности во время термообработки и при нагреве под деформацию. Это позволяет проводить обработку без использования вредных для окружающей среды и строго регламентированных фторидных газов [28–32].

Магниевые сплавы, содержащие кальций, значительно дешевле, чем другие сплавы с высокими эксплуатационными характеристиками. Интерес к этим сплавам в значительной мере возрос в начале XXI в. Сплавы, содержащие кальций, можно подвергать таким технологическим видам обработки, как литье под высоким давлением, прессование, прокатка по разработанным оптимальным схемам деформации и др. [30]. Однако более подробные исследования показали, что введение кальция в малых количествах (до 1,0–2,0 % (по массе)) недостаточно для получения эффекта высоких прочностных и одновременно хороших огнезащитных характеристик деформированных полуфабрикатов.

Повышение содержания кальция более 2,0–2,5 % (по массе) нежелательно ввиду ухудшения технологических свойств магниевых сплавов. В то же время установлено, что дополнительное легирование этих сплавов даже небольшим количеством иттрия в совокупности с кальцием дает положительный суммарный эффект и значительно повышает уровень прочностных и огнезащитных свойств. Однако совместное введение кальция и иттрия изменяет фазовый состав сплава и приводит к необходимости совершенствования технологических процессов изготовления соответствующих деформированных полуфабрикатов [33, 34].

Внимание разработчиков было обращено к проблеме изучения сплавов на основе системы Mg–Al–Zn–Ca–Y при содержании иттрия в количестве не более 0,5–2,0 % (по массе). При этом легирование столь малым количеством иттрия незначительно удорожает сплавы, но в то же время имеет решающее значение для повышения порога воспламенения. В итоге это позволяет расширить области применения сплавов системы Mg–Al–Zn–Ca–Y, в частности, для изделий авиационной и автомобильной промышленности [35–37].

Корейскими исследователями изучена возможность получения высокопрочных сплавов на основе магния, не содержащих РЗЭ. Следует отметить, что разработка процесса деформации подобных магниевых сплавов, в частности прессования, с использованием обычной экструзии является достаточно сложной технологической задачей.

Перспективной представляется возможность легирования магниевых сплавов оловом. В работе [38] приведены результаты исследования нового магниевого сплава системы Mg–2Sn–2Ca марки TX22, не содержащего РЗЭ. Разработанный технологический процесс прессования (с повышенной скоростью деформации) этих сплавов обеспечивает высокие характеристики при растяжении (относительный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 443$  МПа, предел прочности  $\sigma_b = 460$  МПа), которые превышают известные значения прочности серийных магниевых сплавов, не содержащих РЗЭ.

Важным обстоятельством является тот факт, что уровень механических свойств сплава TX22 практически не снижается, даже если скорость прессования значительно (в несколько раз) больше, чем это принято для обычных серийных сплавов. Кроме того, сплавы серии TX22 отличаются низким и экономным уровнем легирования.

Повышенный уровень прочностных характеристик рассматриваемых сплавов, содержащих кальций, можно объяснить формированием зерен субмикрометрического размера, монодисперсными нановыделениями интерметаллидных фаз, остаточными дислокациями и сегрегацией на границах зерен атомов кальция, растворенного в  $\alpha$ -твердом растворе на основе магния.

Установлено, что в сплавах серии TX22 добавление кальция способствует накоплению пирамидальных дислокаций, которые в конечном итоге трансформируются в низкоугловые границы зерен (low angular grain boundaries – LAGB). Высокая плотность LAGB характерна для матричного  $\alpha$ -твердого раствора на основе магния. Механизм прерывистой динамической рекристаллизации (discontinuous dynamic recrystallization) задействован на ранней стадии деформации. На более поздней стадии прессования вступает в действие механизм непрерывной динамической рекристаллизации (continuous dynamic recrystallization), что способствует эффективному повышению скорости зарождения зерен. В то же время сегрегация растворенного кальция на границах субзерен (часто в виде наночастиц фазы  $Mg_2Ca$ ) может блокировать движение атомов других элементов и замедлять процесс роста субзерен, что в конечном итоге приводит к образованию субмикрометрических матричных зерен [38].

Таким образом, формирование подобной мелкозернистой структуры сплавов серии TX22 способствует эффективному повышению таких характеристик, как предел прочности и условный предел текучести.

Полученные результаты позволяют разработать новую контролируемую стратегию создания экономнолегированных магниевых сплавов со сверхвысокой прочностью.

При этом предложенная технология одноступенчатого прессования при сравнительно низких температурах и высокой скорости деформации открывает новые перспективы для производства из этих сплавов высокоэффективных изделий для крупномасштабного промышленного применения [38].

Для получения необходимых пластических характеристик при проведении деформации магниевые сплавы должны содержать некоторое количество легирующих элементов, повышающих пластичность [39, 40].

Авторы работы [39] предлагают для производства высококачественных деформированных (в частности, прессованных) полуфабрикатов магниевые высоколегированные сплавы системы  $Mg-6Al-4Zn-xSn$  (где  $x = 1, 2$  и  $3$  % (по массе)). Сложный и насыщенный состав сплавов этой серии привел к необходимости особенно тщательно отрабатывать технологические режимы деформации.

Установлено, что олово одновременно эффективно повышает прочностные и пластические характеристики, для магниевых сплавов – это исключительное явление. При увеличении содержания олова от 0 до 3 % (по массе) средний размер зерен уменьшается с  $\sim 11$  до  $\sim 4$  мкм. Одновременно количество частиц интерметаллидных фаз  $Mg_2Sn$  и  $Mg_{17}Al_{12}$  возрастает.

При этом с увеличением содержания олова до 1 % (по массе) преобладают процессы двойникования вдоль плоскостей  $\{10\bar{1}2\}$ . При температурах выше  $225^\circ C$  начинают действовать другие плоскости скольжения. Дальнейшее добавление олова до 3 % (по массе) приводит к изменению преобладающих режимов деформации с двойникования вдоль плоскостей  $\{10\bar{1}2\}$  до пирамидального скольжения во время испытаний на растяжение в направлении прессования при комнатной температуре.

Благоприятное сочетание предела прочности (~366 МПа) и относительного удлинения (~19 %) в сплаве системы Mg–6Al–4Zn–3Sn в основном объясняется его высокой способностью к деформационному упрочнению, вызванной повышенной активностью неосновного скольжения.

Данная работа открывает новые возможности для разработки высоколегированных деформируемых магниевых сплавов с высоким уровнем механических свойств.

### Заключения

Анализ научно-технической литературы последних лет позволяет заключить, что проблема разработки новых технологических процессов при производстве высококачественных полуфабрикатов из магниевых сплавов с целью расширения их применения в различных областях (от медицины до космического материаловедения) по-прежнему является актуальной.

Для повышения служебных характеристик магниевых сплавов проводятся изыскания новых композиций при минимизировании вводимых дорогих легирующих РЗЭ либо при их замене на ранее широко не использовавшиеся элементы (например, олово). Рассматриваются новые перспективные системы легирования: Mg–Al–Zn–Sn, Mg–Al–Zn–Ca–Y и Mg–Al–Ca.

Применительно к новым сплавам в широком масштабе проводится разработка соответствующих оптимальных технологий изготовления полуфабрикатов, включающих сочетания различных видов деформации (прессование + HSR, прессование + гибка и т. д.). Конструируется оборудование специального назначения для применения нетривиальных видов обработки давлением магниевых сплавов: гидравлический пресс, в котором действуют два перпендикулярных по отношению друг к другу пуансона; прокатный стан, обеспечивающий HSR, и т. д. Интенсивность этих работ свидетельствует о значимости рассмотренной проблемы.

### Список источников

1. Zeng Z., Stanford N., Davies C.H.J. et al. Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 64 (1). P. 27–62.
2. Pan F., Yang M., Chen X. A review on casting magnesium alloys: modification of commercial alloys and development of new alloys // *Journal of Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32 (12). P. 1211–1221.
3. Alaneme K.K., Okotete E.A. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys a review of traditional and nascent developments // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2017. Vol. 5 (4). P. 460–475.
4. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications // *Materials and Technologies*. 2019. Vol. 53. Is. 6. P. 881–890.
5. Николас А., Рыльник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // *Аэрокосмический курьер*. 2011. № 1. С. 42–44.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. Magnesium Alloys in Aerospace: Benefits and Applications // *MachineMFG: articles*. URL: <https://www.machinemfg.com/ru/magnesium-alloys-in-aerospace> (дата обращения: 01.11.2024).
9. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Овсянников Б.В. Современные деформируемые магниевые сплавы: состояние и перспективы применения в высокотехнологичных отраслях промышленности: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2021. 392 с.
10. Sun L., Bai J., Xue F. et al. The Microstructure and Biocorrosion Behaviors of Mg–Y–Zn Alloy under Different Conditions // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015. P. 382–388.

11. Harandi S.E., Singh R.K. Cracking of Magnesium Alloys in Bioimplant Applications // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju, 2015. P. 397–404.
12. Zhao J., Chen L., Yu K. et al. Effects of Surface Treatment on the Biodegradation Behavior of Mg–6%Zn alloy // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications. Jeju, 2015. P. 405–408.
13. Sasaki T., Elsayed F., Nakata T. et al. Strong and ductile heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al wrought alloys // Acta Materialia. 2015. Vol. 99. P. 176–186.
14. Zhou W., Lin J., Dean T.A. Microstructure and mechanical properties of curved AZ31 magnesium alloy profiles produced by differential velocity sideways extrusion // Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 11 (2). P. 493–508.
15. Магниевые сплавы: справочник в 2 т. / под ред. М.Б. Альтмана, М.Е. Дрица, М.А. Тимоновой, М.В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Т.1: Металловедение магния и его сплавов. Области применения. 232 с.
16. Chen L., Zhang J., Tang J. et al. Microstructure and texture evolution during porthole die extrusion of Mg–Al–Zn alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 259. P. 346–352.
17. Wu W., Zhang P., Zeng X. et al. Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender // Materials Science and Engineering A. 2008. Vol. 486. P. 596–601.
18. Hasegawa O., Manabe K., Murai T. Stretch press bending of AZ31 magnesium alloy extruded square tube // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 2184–2189.
19. Yang Y., Xiong X., Chen. J. et al. Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020 // Journal of Magnesium and Alloys. 2021. Vol. 9 (3). P. 705–747.
20. Song J., Chen J., Xiong X. et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021 // Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 10 (4). P. 863–898.
21. Yan T., Di P., Heng M. et al. Development of ultra-high strength Mg–6Al–4Sn–1Zn alloy sheets by combining extrusion and high-speed rolling // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 29. P. 1487–1497.
22. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Сравнительные исследования структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.
23. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В., Алиханян А.А. Исследование закономерностей влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства среднегабаритных поковок из жаропрочного сплава системы Mg–Zn–Zr–P3Э // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
24. Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Исследование влияния легирующих элементов на температурный порог воспламенения и огнестойкость деформируемого магниевого сплава марки ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
25. Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide // Journal of Magnesium Alloys. 2020. Vol. 8. P. 1–41.
26. Nie J.F., Shin K.S., Zeng Z.R. Microstructure, deformation, and property of wrought magnesium alloys // Metallurgical Materials Transactions A. 2020. Vol. 51 (12). P. 6045–6109.
27. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
28. You B.-S., Park W.-W., Chung I.-S. Effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys // Scripta Materialia. 2000. Vol. 42 (11). P. 1089–1094.
29. Qudong W., Wenzhou C., Xiaoqin Z. et al. Effects of Ca addition the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy // Journal of Materials Science. 2001. Vol. 36. P. 3035–3040.

30. Non-flammable magnesium alloy with excellent mechanical properties, and preparation method thereof: pat. CA2781995A1; appl. 04.10.11; publ. 12.04.12.
31. Gneiger S., Papenberg N., Frank S., Gradinger R. Investigations on microstructure and mechanical properties of non-flammable Mg–Al–Zn–Ca–Y alloys // *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2018 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2018. P. 105–113.
32. Cheng S., Yang G., Fan J. et al. Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of AZ91 alloy at elevated temperatures // *Transactions Nonferrous Metals Society of China*. 2009. Vol. 19 (2). P. 299–304.
33. Kim Y.M., You B.S., Shim M.-S., Kim N.J. Mechanical properties and high-temperature oxidation behavior of Mg–Al–Zn–Ca–Y magnesium alloys // *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2012 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2012. P. 217–219.
34. Seetharaman S., Hao Z., Loy L. et al. Development and characterization of new Magnesium-Yttrium-Calcium alloys // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015. P. 31–37.
35. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магниево-алюминиевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
36. Papenberg N., Gneiger S. Closed Die Forging of Mg–Al–Zn–Ca–Y Alloys // *Light Metals Technologies*. Science Forum Submitted. 2017. Vol. 918. P. 28–33.
37. Dziubinska A., Gontarz A., Dziubinski M., Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications // *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2016. Vol. 10. P. 158–168.
38. Pan H., Qin G., Huang Y. et al. Development of low-alloyed and rare-earth-free magnesium alloys having ultra-high strength // *Journal of Materials Science and Technology*. 2024. Vol. 29. P. 1487–1497.
39. Wang X.-Y., Wang Y.-F., Wang C. et al. A simultaneous improvement of both strength and ductility by Sn addition in as-extruded Mg–6Al–4Zn alloy // *Journal of Materials Science and Technology*. 2020. Vol. 49. P. 117–125.
40. Zhu S.Q., Ringer S.P. On the role of twinning and stacking faults on the crystal plasticity and grain refinement in magnesium alloys // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 144. P. 365–375.

### References

1. Zeng Z., Stanford N., Davies C.H.J. et al. Magnesium extrusion alloys: a review of developments and prospects. *International Materials Reviews*, 2018, vol. 64 (1), pp. 27–62.
2. Pan F., Yang M., Chen X. A review on casting magnesium alloys: modification of commercial alloys and development of new alloys. *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32 (12), pp. 1211–1221.
3. Alaneme K.K., Okotete E.A. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys a review of traditional and nascent developments. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2017, vol. 5 (4). P. 460–475.
4. Annamalai S., Periyakgoundar S., Gunasekaran S. Magnesium alloys: a review of applications. *Materials and Technologies*, 2019, vol. 53, is. 6, pp. 881–890.
5. Nicholas A., Rylnik S. Application of magnesium components in the aerospace industry. *Aerokosmicheskiy kuryer*, 2011, no. 1, pp. 42–44.
6. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. *Magnesium Alloys in Aerospace: Benefits and Applications*. MachineMFG: articles. Available at: <https://www.machinemfg.com/ru/magnesium-alloys-in-aerospace> (accessed: November 01, 2024).

9. Volkova E.F., Rokhlin L.L., Ovsyannikov B.V. *Modern deformable magnesium alloys: status and prospects of application in high-tech industries: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2021, 392 p.
10. Sun L., Bai J., Xue F. et al. The Microstructure and Biocorrosion Behaviors of Mg–Y–Zn Alloy under Different Conditions. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 382–388.
11. Harandi S.E., Singh R.K. Cracking of Magnesium Alloys in Bioimplant Applications. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 397–404.
12. Zhao J., Chen L., Yu K. et al. Effects of Surface Treatment on the Biodegradation Behavior of Mg–6%Zn alloy. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 405–408.
13. Sasaki T., Elsayed F., Nakata T. et al. Strong and ductile heat-treatable Mg–Sn–Zn–Al wrought alloys. *Acta Materialia*, 2015, vol. 99, pp. 176–186.
14. Zhou W., Lin J., Dean T.A. Microstructure and mechanical properties of curved AZ31 magnesium alloy profiles produced by differential velocity sideways extrusion. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 11 (2), pp. 493–508.
15. *Magnesium alloys: a reference book in 2 vols.* Ed. M.B. Altman, M.E. Drits, M.A. Timonova, M.V. Chukhrov. Moscow: Metallurgy, 1978. Vol. 1: Metallurgy of magnesium and its alloys. Application areas, 232 p.
16. Chen L., Zhang J., Tang J. et al. Microstructure and texture evolution during porthole die extrusion of Mg–Al–Zn alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 259, pp. 346–352.
17. Wu W., Zhang P., Zeng X. et al. Bendability of the wrought magnesium alloy AM30 tubes using a rotary draw bender. *Materials Science and Engineering A*, 2008, vol. 486, pp. 596–601.
18. Hasegawa O., Manabe K., Murai T. Stretch press bending of AZ31 magnesium alloy extruded square tube. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 81, pp. 2184–2189.
19. Yang Y., Xiong X., Chen. J. et al. Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, vol. 9 (3), pp. 705–747.
20. Song J., Chen J., Xiong X. et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 10 (4), pp. 863–898.
21. Yan T., Di P., Heng M. et al. Development of ultra-high strength Mg–6Al–4Sn–1Zn alloy sheets by combining extrusion and high-speed rolling. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 1487–1497.
22. Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A. Comparative studies of the structure, features of the phase composition and mechanical properties of deformed semi-finished products from VMD16 magnesium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-13-26.
23. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V., Alikhanyan A.A. Studies of the regularities of the heat treatment influence on the structure, phase composition and mechanical properties of medium-sized forgings made of heat-resistant alloy of the Mg–Zn–Zr–REE system. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
24. Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A. Investigation of the influence of alloying elements on the temperature threshold of ignition and fire resistance of a VMD16 wrought magnesium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-60-74.
25. Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium Alloys*, 2020, vol. 8, pp. 1–41.
26. Nie J.F., Shin K.S., Zeng Z.R. Microstructure, deformation, and property of wrought magnesium alloys. *Metallurgical Materials Transactions A*, 2020, vol. 51 (12), pp. 6045–6109.
27. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.

28. You B.-S., Park W.-W., Chung I.-S. Effect of calcium additions on the oxidation behavior in magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 2000, vol. 42 (11), pp. 1089–1094.
29. Qudong W., Wenzhou C., Xiaoqin Z. et al. Effects of Ca addition the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Journal of Materials Science*, 2001, vol. 36. P. 3035–3040.
30. *Non-flammable magnesium alloy with excellent mechanical properties, and preparation method thereof*: pat. CA2781995A1; appl. 04.10.11; publ. 12.04.12.
31. Gneiger S., Papenberg N., Frank S., Gradinger R. Investigations on microstructure and mechanical properties of non-flammable Mg–Al–Zn–Ca–Y alloys. *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2018 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2018, pp. 105–113.
32. Cheng S., Yang G., Fan J. et al. Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of AZ91 alloy at elevated temperatures. *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 2009, vol. 19 (2), pp. 299–304.
33. Kim Y.M., You B.S., Shim M.-S., Kim N.J. Mechanical properties and high-temperature oxidation behavior of Mg–Al–Zn–Ca–Y magnesium alloys. *Proceedings of the TNS Annual Meeting & Exhibition. Magnesium Technology 2012 – The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, 2012, pp. 217–219.
34. Seetharaman S., Hao Z., Loy L. et al. Development and characterization of new Magnesium-Yttrium-Calcium alloys. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*. Jeju, 2015, pp. 31–37.
35. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokoshukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 00. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
36. Papenberg N., Gneiger S. Closed Die Forging of Mg–Al–Zn–Ca–Y Alloys. *Light Metals Technologies. Science Forum Submitted*, 2017, vol. 918, pp. 28–33.
37. Dziubinska A., Gontarz A., Dziubinski M., Barszcz M. The forming of magnesium alloy forgings for aircraft and automotive applications. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 2016, vol. 10, pp. 158–168.
38. Pan H., Qin G., Huang Y. et al. Development of low-alloyed and rare-earth-free magnesium alloys having ultra-high strength. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, vol. 29, pp. 1487–1497.
39. Wang X.-Y., Wang Y.-F., Wang C. et al. A simultaneous improvement of both strength and ductility by Sn addition in as-extruded Mg–6Al–4Zn alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 2020, vol. 49, pp. 117–125.
40. Zhu S.Q., Ringer S.P. On the role of twinning and stacking faults on the crystal plasticity and grain refinement in magnesium alloys. *Acta Materialia*, 2018, vol. 144, pp. 365–375.

## Информация об авторах

**Волкова Екатерина Федоровна**, главный научный сотрудник, д.т.н. НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Алиханян Арман Артакович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Акинина Мария Владимировна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Мостяев Игорь Владимирович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

## Information about the authors

**Ekaterina F. Volkova**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Arman A. Alikhanyan**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Maria V. Akinina**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Igor V. Mostyaev**, Leading Engineer, 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 06.12.2024.  
The article was submitted 02.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 06.12.2024.

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ И ЛОКАЛЬНОМУ РЕМОНТУ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Н.В. Трофимов<sup>1</sup>, А.А. Леонов<sup>1</sup>, В.А. Дуюнова<sup>1</sup>, М.С. Токарев<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.** Представлены результаты исследований технологии устранения литейных дефектов методом холодного газодинамического напыления серийных магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 с использованием серийных порошков. Исследовано влияние порошковых композиций на механические свойства и адгезию. Рассмотрены результаты исследований образцов и отливок магниевого сплава ВМЛ26, полученных по различным режимам выплавки. Выбран режим выплавки магниевого сплава ВМЛ26 на индукционной плавильной установке. Исследованы микроструктура, химический состав и механические свойства образцов из магниевых сплавов.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, фильтрация, магниевые сплавы, порошки, сила тока индуктора

**Для цитирования:** Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуюнова В.А., Токарев М.С. Современные подходы к повышению качества литья и локальному ремонту изделий из магниевых сплавов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.

Scientific article

## MODERN APPROACHES TO IMPROVING THE QUALITY OF CASTING AND LOCAL REPAIRS OF PRODUCTS MADE OF MAGNESIUM ALLOYS

*N.V. Trofimov<sup>1</sup>, A.A. Leonov<sup>1</sup>, V.A. Duyunova<sup>1</sup>, M.S. Tokarev<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.** The article presents the results of research on the technology of eliminating casting defects by cold gas-dynamic spraying of serial magnesium alloys ML5hp and ML10 using serial powders. The influence of powder compositions on mechanical properties and adhesion has been studied. The results of studies of samples and castings of magnesium alloy VML26 obtained under various smelting modes are considered. The mode of smelting of magnesium alloy VML26 in the induction melting unit is selected. The microstructure, chemical composition, and mechanical properties of magnesium alloy samples were studied.

**Keywords:** cold gas dynamic spraying, filtration, magnesium alloys, powders, inductor current

**For citation:** Trofimov N.V., Leonov A.A., Duyunova V.A., Tokarev M.S. Modern approaches to improving the quality of casting and local repairs of products made of magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-57-69.

## Введение

В настоящее время в промышленности предъявляют высокие требования к изделиям в части увеличения ресурса и срока сервисного обслуживания, что возможно только при использовании качественных материалов. Повысить эксплуатационные характеристики литых деталей из магниевых сплавов можно путем усовершенствования имеющихся технологий и разработки новых технологических подходов.

При выплавке и механической обработке отливок встречаются поверхностные дефекты, которые необходимо устранять. Одним из перспективных направлений является локальный ремонт отливок и деталей с использованием порошка методом холодного газодинамического напыления (ХГН) как в процессе производства деталей, так и при ремонте готового изделия [1–3].

Метод ХГН – это перспективный способ устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров отливок и деталей из магниевых сплавов. При механической обработке магниевых сплавов внутренние дефекты могут становиться поверхностными. В процессе эксплуатации может возникать деградация поверхности детали. Метод ХГН позволяет оперативно в кратчайшие сроки устранить дефекты: в процессе напыления при ударах нерасплавленных металлических частиц о место дефекта происходит их пластическая деформация, и дефект послойно заполняется.

Кроме того, метод ХГН можно использовать для герметизации отливок и деталей, подверженных воздействию различных жидкостей и масел. В связи с этим активно ведется разработка новых порошковых материалов и технологий их напыления [4–6].

Одним из способов повышения качества магниевых сплавов является фильтрация расплава, применяемая для удаления оставшихся нежелательных примесей (неметаллических и шлаковых включений). Для этого используются различные фильтры и сетки. Кроме того, применяется метод флотации, при котором расплавленный магниевый сплав продувается газом, например аргоном или гелием. В результате происходит прилипание частиц оксидов, хлоридов, неметаллических включений к газовым пузырькам, которые выносят их на поверхность и в дальнейшем удаляются вместе с образующимся шлаком. Однако фильтрации не всегда уделяют должное внимание, что приводит к получению различного рода дефектов [7–10].

Фильтрация позволяет улучшить структуру и механические свойства сплава, уменьшить количество дефектов внутри и на поверхности изделий. Это повышает надежность и долговечность изделий, что особенно важно в производстве ответственных изделий авиационной техники [11–13].

Для изготовления фильтров для магниевых сплавов используют материалы с высокой термостойкостью. К таким материалам относятся кварц, стекловолокно, керамика и стальные сетки. Керамические фильтры обычно изготавливают из оксида алюминия, оксида циркония или карбида кремния. Кварцевые фильтры также являются эффективными при фильтрации магниевых сплавов, так как они обладают высокой термостойкостью и химической инертностью. Выбор типа фильтра зависит от состава магниевых сплавов, процесса литья и требований к качеству конечного продукта. Керамические фильтры обычно используют для магниевых сплавов, содержащих высокую концентрацию соединений оксида циркония, поскольку они могут улавливать эти включения. Металлические фильтры могут быть более эффективными для удаления шлаковых примесей [14–17].

Фильтрация магниевых сплавов является важным этапом производства, который позволяет получить чистый и высококачественный продукт, а также может повысить производительность.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых

сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Материалы и методы

В качестве материалов использовали магниевые сплавы марок МЛ5пч (системы Mg–Al–Zn), МЛ10 и ВМЛ26 (системы Mg–PЗМ–Zr). Сплавы выплавляли с использованием индукционной печи в защитной газовой среде, состоящей из смеси элегаза и углекислого газа.

Для устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров использовали установку ДИМЕТ-405 и порошки марок А-80, А-20.

Испытания на растяжение образцов из магниевых сплавов проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Химический состав определяли методом атомно-эмиссионного анализа в соответствии с ГОСТ 3240.0–3240.21–76, МИ 1.2.078 и МИ 1.2.079, коррозионную стойкость – по ГОСТ 9.913–90, адгезию лакокрасочных покрытий – по ГОСТ 15140–78.

Микроструктуру образцов исследовали в соответствии с МР 21-31–85 и ГОСТ Р ИСО 22309–2015 с помощью просвечивающего электронного микроскопа с термополюсным катодом типа Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемку проводили в сканирующем режиме с применением светлопольного (BF) и высокоуглового кольцевого темнопольного (HAADF) детекторов. Съемку электронных дифракций в сходящемся пучке осуществляли с помощью нижней CCD-камеры. Локальный химический анализ структурных составляющих проводили рентгеноспектральным методом с использованием энергодисперсионного спектрометра. Обработку результатов исследований и подбор кристаллической решетки интерметаллидных соединений осуществляли с помощью специализированного программного обеспечения.

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

### Результаты и обсуждение

#### *Устранение литейных дефектов и восстановление геометрических размеров*

Для устранения литейных дефектов методом ХГН на отливках из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 изготавливали литейные формы и стержни. В качестве основы для изготовления литейных форм и стержней выбран кварцевый песок с высокой однородностью и средним размером зерна 0,16–0,25 мм марки 2К2О102 по ГОСТ 2138–91. В качестве смолы использовали фенолформальдегидную смолу марки АСП-Н и отвердитель марки АМС-10. Формы и стержни изготовлены с применением литейной оснастки для получения отливок «Корпус» на формовочном комплексе. Полученные формы, стержни и отливки представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Верхние и нижние полуформы отливки «Корпус» со стержнями



Рис. 2. Отливки «Корпус» из сплавов МЛ10 (а) и МЛ5пч (б)

Проведены исследования химического состава серийных сплавов МЛ5пч и МЛ10, по результатам которых установлено их полное соответствие ГОСТ 2856–79 по содержанию основных элементов и примесей. Отливки из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 прошли термическую обработку по режимам Т4 и Т6 соответственно.

Исследованы механические свойства отдельно отлитых образцов из сплавов МЛ5пч и МЛ10 на соответствие ГОСТ 2856–79 (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства отдельно отлитых образцов из сплавов МЛ5пч и МЛ10

| Сплав               | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , %   |
|---------------------|------------------|----------------------|----------------|
| МЛ5пч:              |                  |                      |                |
| исследуемый образец | <u>240–250</u>   | <u>90–100</u>        | <u>5,5–7,2</u> |
|                     | 240              | 95                   | 6,1            |
| по ГОСТ 2856–79     | 235              | 90                   | 5,0            |
| МЛ10:               |                  |                      |                |
| исследуемый образец | <u>235–245</u>   | <u>140–155</u>       | <u>3,0–3,6</u> |
|                     | 235              | 145                  | 3,2            |
| по ГОСТ 2856–79     | 230              | 140                  | 3,0            |

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – средние значения.

Для опробования технологии, позволяющей устранить литейные дефекты методом ХГН, отобраны отливки с характерными дефектами, такими как газовые раковины и поры.

Для устранения дефектов выбраны два порошка марок А-80 и А-20. По трем различным режимам с использованием установки ДИМЕТ-405 выполнено напыление на отобранные отливки с литейными дефектами. На рис. 3 представлена отливка с характерным дефектом до и после напыления.

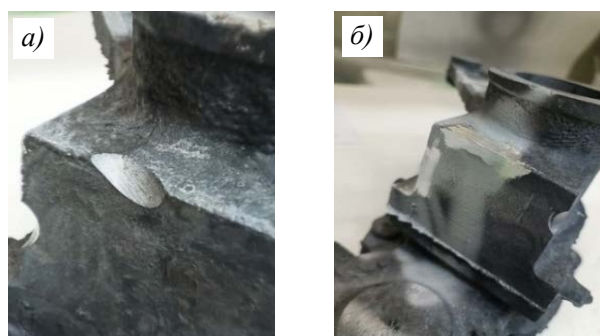


Рис. 3. Отливка «Корпус» до (а) и после напыления (б)

Для исследований структуры, механических свойств, коррозионной стойкости и адгезии из отливок с устраненными дефектами вырезаны заготовки.

Исследованы механические свойства образцов из магниевых сплавов МЛ15пч и МЛ10 с дефектами до и после напыления (табл. 2). В процессе напыления варьировали расход порошка 15, 25 и 40 г/мин в соответствии с режимами установки 3, 4 и 5. Температура воздушного потока составила 75 и 100 °С.

Таблица 2

**Механические свойства (минимальные значения) образцов из сплавов МЛ15пч и МЛ10**

| Сплав                                                                                                                                    | Образец              | Порошко-<br>вый<br>материал | Расход<br>порошка,<br>г/мин | Температу-<br>ра воздуш-<br>ного пото-<br>ка, °С | σ <sub>в</sub> ,<br>МПа | σ <sub>0,2</sub> ,<br>МПа | δ, % | σ <sub>в</sub> <sup>нап</sup> / σ <sub>в</sub> <sup>осн</sup> |   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|------|---------------------------------------------------------------|---|
| МЛ15пч                                                                                                                                   | С дефектом           | А-80                        | 15                          | 75                                               | 65                      | 55                        | 1,8  | 0,30                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 90                      | 50                        | 0,8  | 0,46                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 25                          | 75                                               | 190                     | 80                        | 5,2  | 0,97                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 195                     | 90                        | 5,5  | 1,00                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 40                          | 75                                               | 180                     | 95                        | 3,8  | 0,92                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 195                     | 95                        | 5,2  | 1,00                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      | А-20                        | 15                          | 75                                               | 75                      | 60                        | 2,0  | 0,38                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 90                      | 50                        | 0,7  | 0,46                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 25                          | 75                                               | 185                     | 80                        | 5,2  | 0,94                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 195                     | 95                        | 5,2  | 1,00                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 40                          | 75                                               | 190                     | 95                        | 3,8  | 0,97                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 195                     | 90                        | 5,2  | 1,00                                                          |   |
|                                                                                                                                          | Без дефекта          |                             |                             |                                                  |                         | 195                       | 95   | 5,3                                                           | — |
|                                                                                                                                          | По ОСТ<br>1 90248–77 | —                           |                             |                                                  |                         | ≥135                      | ≥78  | ≥0,5                                                          |   |
| МЛ10                                                                                                                                     | С дефектом           | А-80                        | 15                          | 75                                               | 160                     | 125                       | 0,5  | 0,68                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 165                     | 120                       | 0,4  | 0,70                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 25                          | 75                                               | 200                     | 150                       | 1,7  | 0,85                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 210                     | 155                       | 1,6  | 0,89                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 40                          | 75                                               | 220                     | 165                       | 1,6  | 0,93                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 225                     | 160                       | 1,7  | 0,95                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      | А-20                        | 15                          | 75                                               | 155                     | 120                       | 0,4  | 0,65                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 165                     | 120                       | 0,6  | 0,70                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 25                          | 75                                               | 210                     | 135                       | 1,6  | 0,89                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 200                     | 170                       | 1,8  | 0,85                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             | 40                          | 75                                               | 220                     | 165                       | 1,6  | 0,93                                                          |   |
|                                                                                                                                          |                      |                             |                             | 100                                              | 235                     | 170                       | 1,7  | 1,00                                                          |   |
|                                                                                                                                          | Без дефекта          |                             |                             |                                                  |                         | 235                       | 170  | 1,6                                                           | — |
|                                                                                                                                          | По ОСТ<br>1 90248–77 | —                           |                             |                                                  |                         | ≥175                      | ≥98  | ≥1,5                                                          |   |
| Примечание. σ <sub>в</sub> <sup>нап</sup> / σ <sub>в</sub> <sup>осн</sup> – соотношение предела прочности образцов после и до напыления. |                      |                             |                             |                                                  |                         |                           |      |                                                               |   |

По результатам анализа полученных данных установлено, что использование порошков А-80 и А-20 возможно при скорости подачи не менее 25 г/мин. При расходе 15 г/мин не обеспечивается плотное прилегание порошка в местах дефектов и происходит отслаивание. Большинство образцов разрушаются в местах дефектов. На рис. 4 представлены образцы с разрушением вне напыляемого слоя и в местах напыления с низкой скоростью подачи порошка.

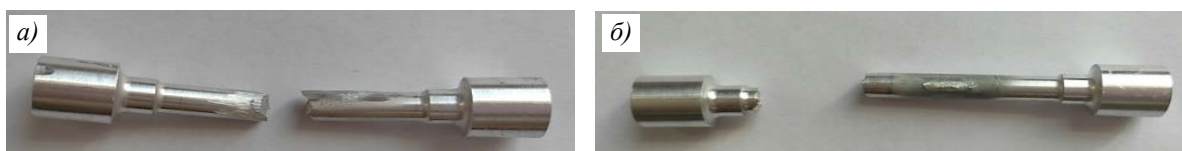


Рис. 4. Разрыв образцов из магниевого сплава МЛ10 в зоне напыления (а) и вне зоны напыления (б)

Анализ микроструктуры показал, что на образцах из сплавов МЛ5пч и МЛ10 с напылением порошка со скоростью 25 и 40 г/мин на границе «порошок–основной металл» порошок плотно прилегает к основному металлу, местами диффундируя в верхний слой основного материала (рис. 5). При скорости напыления 15 г/мин порошок располагается исключительно на поверхности, не образуя прочного контакта, и отслаивается. При механических испытаниях образцы с порошками, напыленными со скоростью 15 г/мин, разрушились в местах напыления либо порошок отслаивался.

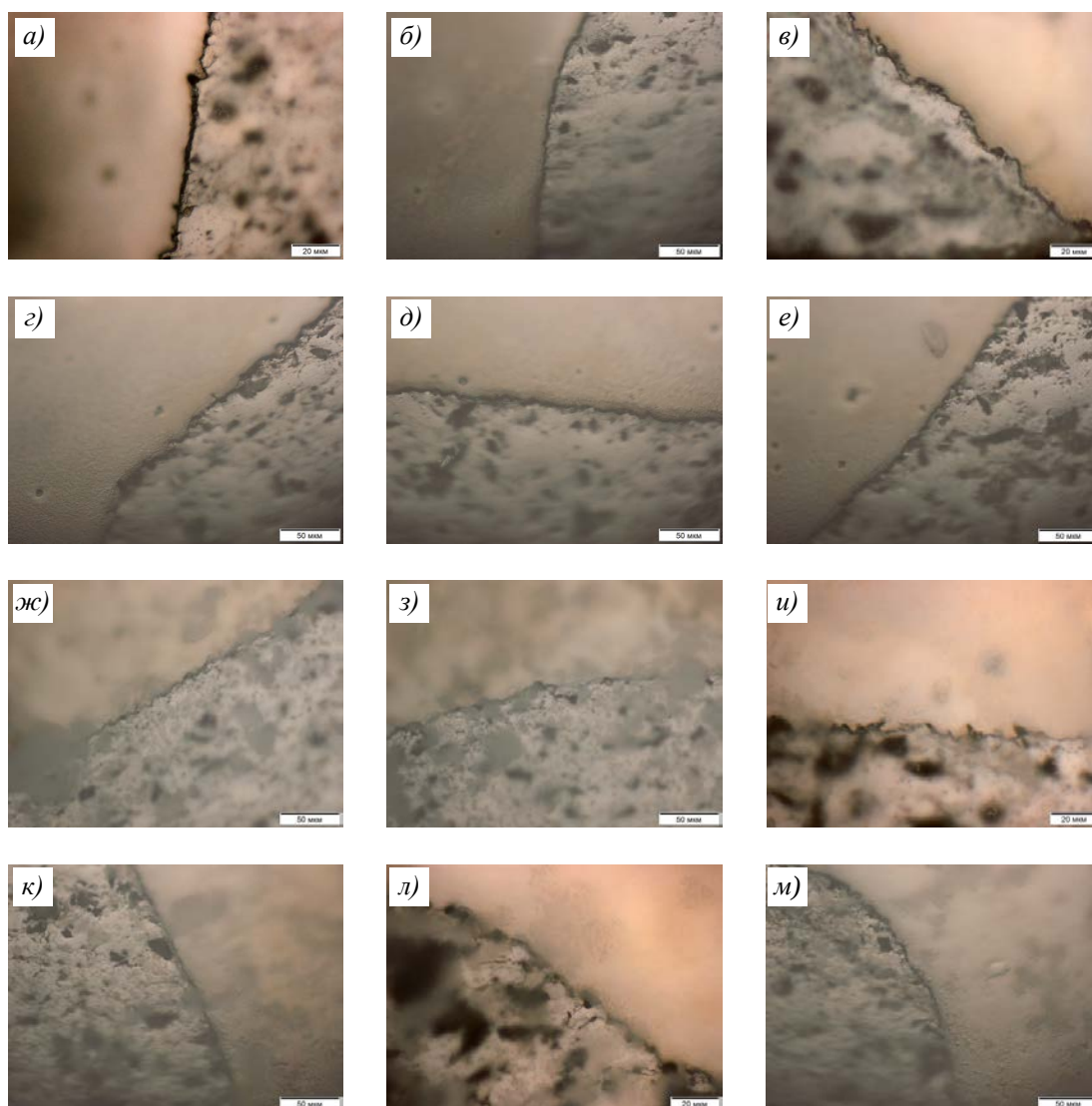


Рис. 5. Микроструктуры образцов из сплавов МЛ5пч (а–е) и МЛ10 (ж–м) с порошками марки А-20 (а–в, ж–и) и А-80 (з–е, к–м), нанесенными по режиму 3 (а, з, ж, к), 4 (б, д, з, л) и 5 (в, е, и, м)

Ввиду недостаточной скорости напыления 15 г/мин для определения адгезии выбраны образцы с порошками, нанесенными со скоростью напыления 25 и 45 г/мин.

На образцы из магниевых сплавов МЛ15пч и МЛ10 с устраненными дефектами наносили лакокрасочное покрытие (один слой грунтовки ЭП-076 и два слоя эмали ЭП-140). Адгезию покрытий определяли на 26 образцах с порошками А-20 и А-80. По результатам испытаний всех образцов адгезия составила 1 балл (рис. 6).



Рис. 6. Образцы из магниевых сплавов после испытаний на адгезию

Полученные результаты исследований позволили выбрать технологические параметры устранения литейных дефектов на отливках и образцах из магниевых сплавов на установке ДИМЕТ-405.

#### ***Фильтрация и сила тока индуктора***

В качестве фильтров в серийном производстве для сплава системы Mg–PЗМ–Zr используют пенокерамические фильтры и стальные сетки. Для фильтрации магниевого сплава ВМЛ26 выбрана сетка из стали марки Ст.3 с диаметром отверстий 0,5–1 мм.

Для обеспечения требуемого содержания легирующих элементов, особенно трудно вводимых и плохо усвояемых, таких как цирконий и иттрий, равномерно распределенных во всем объеме, необходимо стабильное перемешивание расплава (индукционное перемешивание). Кроме того, следует избегать резкого снижения температуры жидкого металла при выплавке сплавов.

При выплавке в расплаве формируются две области рециркуляции вихревых токов. Процессом перемешивания можно управлять, изменяя частоту или силу тока индуктора. При высоком уровне тока происходит более интенсивное перемешивание, и металл становится однороднее. Однако при постоянном высоком токе стенки тигля изнашиваются быстрее. При низком значении силы тока продолжительность выплавки увеличивается в 2–3 раза. В тигле практически не происходит перемешивания ввиду слабого действия тока, что приводит к неоднородности химического состава в сплаве.

Для выплавки магниевого сплава ВМЛ26 на индукционной плавильной установке выбраны три режима нагрева при силе тока индуктора 50, 100 и 150 А. Указанные режимы нагрева выбраны с целью обеспечения стабильной работы индукционной печи, предотвращения перегрева металла и износа тигля при максимальном режиме работы индукционной плавильной установки.

Исследовано влияние силы тока индуктора на однородность химического состава и механические свойства (предел прочности, предел текучести, относительное удлинение) сплава ВМЛ26 системы Mg–PЗМ–Zr. При выплавке по режиму с силой тока индуктора 50 А установлено несоответствие химического состава по цинку, цирконию, гадолинию и церию, при 100 А – недостаточное содержание циркония. Осаждение редкоземельных металлов (PЗМ) и циркония можно объяснить недостаточным влиянием индукционных токов на перемешивание расплава.

При выплавке сплава ВМЛ26 системы Mg–PЗМ–Zr при силе тока индуктора 50 А увеличивается продолжительность расплавления металла, что приводит к выгоранию легкоплавкого цинка, а также не обеспечивает растворения легирующих элементов.

Исследованы механические свойства отдельно отлитых образцов из магниевого сплава ВМЛ26, полученных по различным режимам нагрева с использованием в качестве фильтров стальной сетки и пенокерамического фильтра (табл. 3). Установлено, что режим при силе тока 150 А обеспечивает уровень механических свойств сплава ВМЛ26, соответствующий требованиям ТУ 1-595-24-1942–2021.

Таблица 3

**Механические свойства отдельно отлитых образцов из сплава ВМЛ26**

| Свойства                                                                            | Значения свойств образцов  |                       |                       | по ТУ 1-595-24-1942–2021 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
|                                                                                     | при силе тока индуктора, А |                       |                       |                          |
|                                                                                     | 50                         | 100                   | 150                   |                          |
| $\sigma_{\text{в}}$ , МПа                                                           | $\frac{260-270}{260}$      | $\frac{295-305}{300}$ | $\frac{300-310}{305}$ | $\geq 300$               |
| $\sigma_{0,2}$ , МПа                                                                | $\frac{170-185}{200}$      | $\frac{195-200}{200}$ | $\frac{190-220}{210}$ | $\geq 120$               |
| $\delta$ , %                                                                        | $\frac{2,9-5,7}{4,2}$      | $\frac{2,6-5,9}{3,5}$ | $\frac{2,5-6,4}{3,9}$ | $\geq 2,0$               |
| Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – средние значения. |                            |                       |                       |                          |

Исследована микроструктура образцов из магниевого сплава ВМЛ26 (рис. 7–12), выплавленных при различной силе тока индуктора с использованием в качестве фильтра стальной сетки.

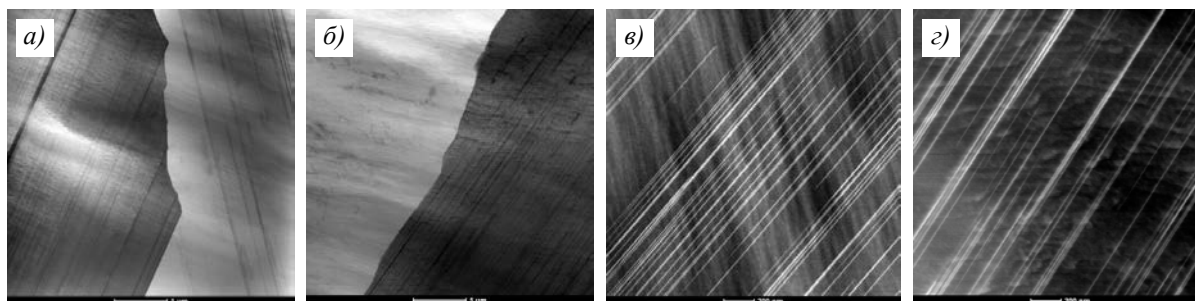


Рис. 7. Микроструктуры образцов из сплава ВМЛ26 (светлопольные изображения), выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б, з)

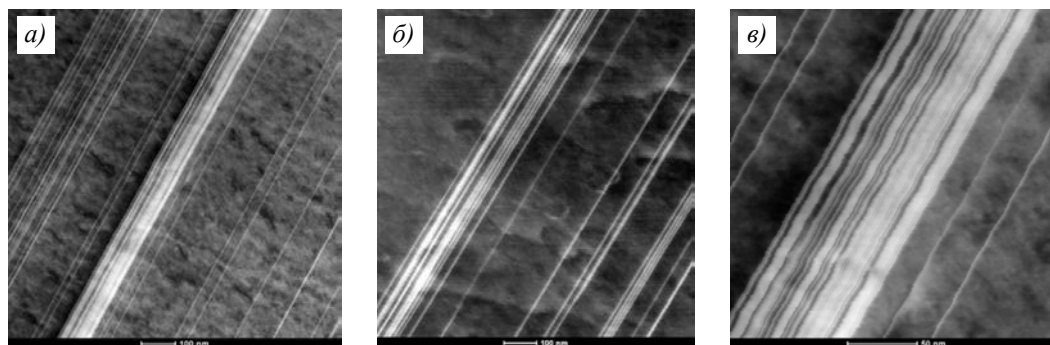


Рис. 8. Примеры LPSO-фаз в объеме зерен  $\alpha$ -Mg (HAADF-изображения) в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б)

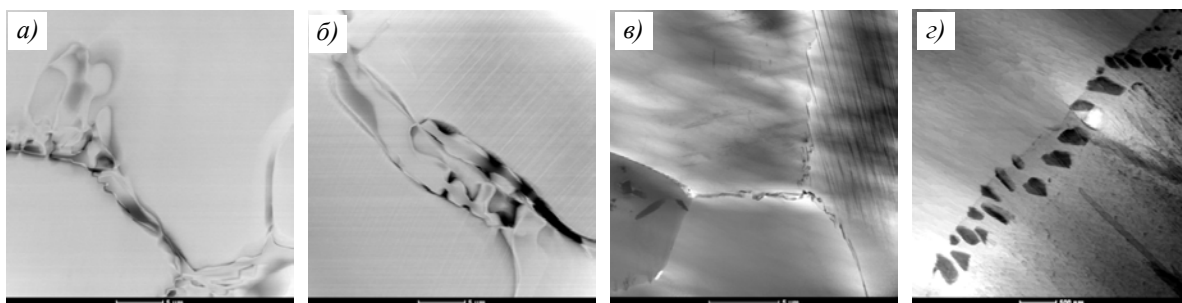


Рис. 9. Эвтектика и интерметаллидные включения по границам зерен в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а, в) и 150 А (б, з)

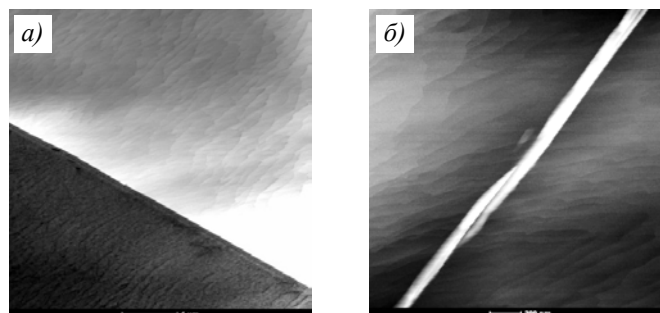


Рис. 10. Микроструктуры образца из сплава ВМЛ26, выплавленного при силе тока 100 А: а – два зерна  $\alpha$ -Mg; б – зернограничные выделения интерметаллидной фазы

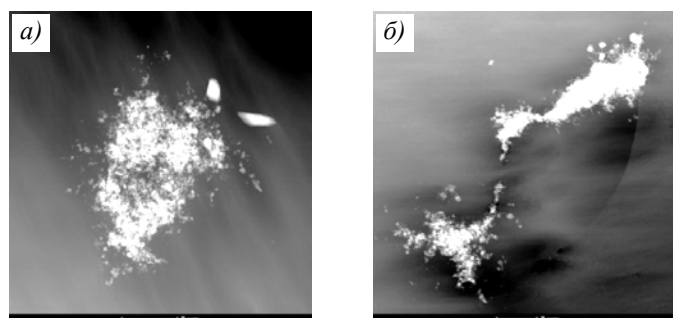


Рис. 11. Скопления цирконидов иттрия в образцах из сплава ВМЛ26, выплавленных при силе тока 50 (а) и 100 А (б)

Структура материала образцов представлена зернами твердого раствора  $\alpha$ -Mg, в объеме которых равномерно распределены пластины  $\gamma'$ -фазы, содержащие РЗМ. Небольшая доля пластин  $\gamma'$ -фазы образует LPSO-фазы (long-period stacking order phases) шириной до 100 нм. Вдоль части межзеренных границ расположены частицы интерметаллидной  $\beta_1$ -фазы, содержащей РЗМ, а также области эвтектики, состоящей из твердого раствора магния и интерметаллидной фазы магния с Gd, Nd, Y и Zn.

Скопления гидридов иттрия  $YH_2$  с мелкодисперсными частицами, содержащими цирконий (предположительно, гидриды циркония), обнаружены в объеме образцов, выплавленных при силе тока 50 и 100 А (рис. 12), но не выявлены в образце, полученном при силе тока 150 А.

На основании полученных результатов исследования установлено, что наличие в сплаве гидридов иттрия и циркония (рис. 11 и 12) при использовании силы тока индуктора 50 и 100 А – результат недостаточного перемешивания и выведения этих соединений

на поверхность расплава. Более интенсивное перемешивание при силе тока индуктора 150 А обеспечило выведение гидридов из расплава на поверхность и их последующее удаление.

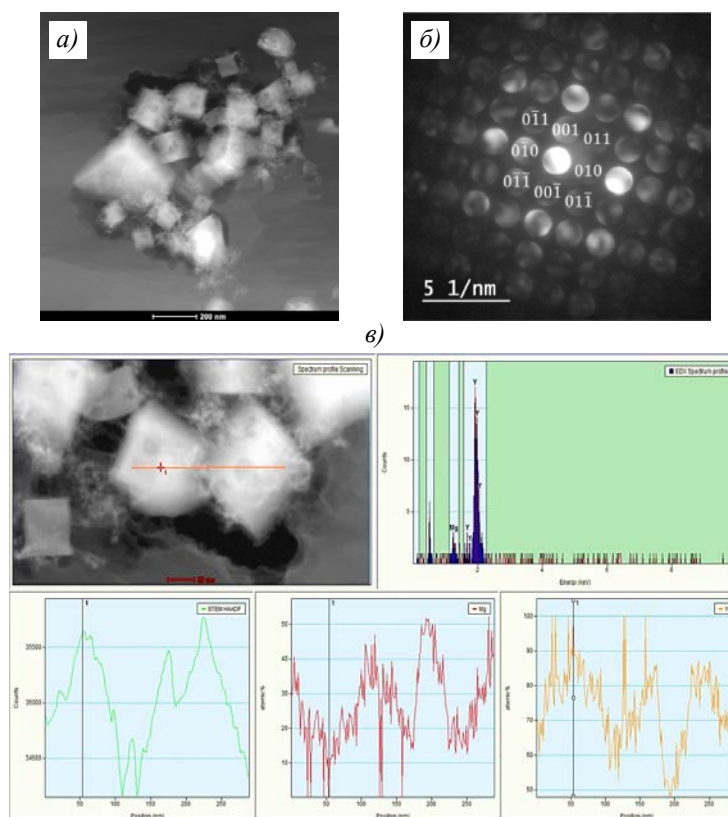


Рис. 12. Результаты дифракционного и элементного анализа гидридов иттрия  $\text{YH}_2$ : *а* – темнопольное изображение; *б* – дифракция в сходящемся пучке, проиндексированная в рефлексах  $\text{YH}_2$ , ось зоны  $[100]$ ; *в* – результаты энергодисперсионной спектроскопии по линии. Присутствие магния – следствие перекрытия с матрицей

Исследована коррозионная стойкость образцов из магниевого сплава ВМЛ26, выплавленных по различным режимам нагрева (табл. 4). Показано повышение коррозионной стойкости по количеству выделившегося водорода при увеличении силы тока индуктора.

Таблица 4

**Коррозионная стойкость сплава ВМЛ26 при выплавке  
на плавильной установке с различной силой тока индуктора**

| Сила тока индуктора, А | Коррозионная стойкость в 3%-ном растворе NaCl по выделению водорода за 48 ч, $\text{см}^3/\text{см}^2$ (средние значения) |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 50                     | 1,55                                                                                                                      |
| 100                    | 1,20                                                                                                                      |
| 150                    | 0,80                                                                                                                      |

Коррозионная стойкость сплава, выплавленного при силе тока индуктора 150 А, удовлетворяет данным паспорта № 2042 на пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав марки ВМЛ26.

### Заключения

По результатам исследований микроструктуры, механических свойств, адгезии и опробования разработанной технологии выбраны технологические режимы нанесения порошков на отливки из магниевых сплавов МЛ5пч и МЛ10 методом ХГН для устранения литейных дефектов и восстановления геометрических размеров.

Исследования микроструктуры, механических свойств, коррозионной стойкости магниевых сплавов ВМЛ26 и полученные положительные результаты позволили выбрать режим выплавки на индукционной плавильной установке. Использование режима выплавки при силе тока индуктора 150 А обеспечивает необходимый уровень свойств сплава ВМЛ26 и предотвращает попадание в отливки гидридов иттрия и циркония, которые негативно влияют на механические свойства и коррозионную стойкость.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
3. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплавов МЛ9 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Амелин А.С. Критериальная оценка усадочной пористости в отливках из магниевых сплавов // Тез. док. XLIII Междунар. молодеж. науч. конф. «Гагаринские чтения 2017». М.: МАИ, 2017. С. 435.
6. Трапезников А.В., Власова К.А., Решетников Ю.В. Применение таблетированных модификаторов для литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
7. Zhang Y., Rong W., Wu Y. et al. A detailed HAADF-STEM study of precipitate evolution in Mg–Gd alloy // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 777. P. 531–543. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.193.
8. Пожаробезопасный высокопрочный литейный магниевый сплав: пат. 2753660 Рос. Федерация; заявл. 02.11.20; опубл. 20.08.02.
9. Яровая Е.И., Леушин И.О., Спасская М.М., Ларин М.А. Эффективность управления литейными технологическими процессами // Черные металлы. 2018. № 3. С. 29–33.
10. Коробков К.С., Полянский И.П. Влияние режимов термической обработки на структуру и механические свойства отливок из магниевых сплавов МЛ5пч // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 4 (43). С. 397–398.
11. Трофимов Н.В., Леонов А.А. Исследование влияния легирующих элементов (Nb и Ti) на содержание примесей и механические свойства высокопрочного магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr // Металлы. 2020. № 3. С. 14–18.
12. Фомина М.А., Захаров К.Е., Ямщиков Е.И., Трофимов Н.В. Подбор и исследование оптимальной рецептуры состава для локального удаления продуктов коррозии с магниевых сплавов, а также технологии его применения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.

13. Du Z., Peng Y., Teng H. et al. Formation and growth of precipitates in a Mg–7Gd–5Y–1Nd–2Zn–0.5Zr alloy aged at 200 °C // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022. Vol. 11. No. 3. P. 2326–2339. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
14. Мухина И.Ю. Основы технологии плавки магниевых сплавов в защитных средах // *Литейное производство*. 2021. № 1. С. 2–8.
15. Шаломеев В.А. Модифицирование магниевого сплава Мл-5 при фильтрации через углерод-содержащие материалы // *Конструкционные материалы*. 2008. № 2. С. 198–201.
16. Моисеев К.В., Смыков А.Ф., Бережной Д.В. Автоматизированное проектирование системы питания крупногабаритных корпусных отливок из легких сплавов // *Технология легких сплавов*. 2011. № 1. С. 69–72.
17. Бобрышев Б.Л., Моисеев В.С., Александрова Ю.П. Совершенствование комплексной обработки магниевых сплавов при плавке // *Технологии легких сплавов*. 2021. № 3. С. 35–44.

### References

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
2. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, p. 331–334.
3. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
4. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
5. Amelin A.S. Critical assessment of shrinkage porosity in magnesium alloy castings. *Reports XLIII Int. Youth Scientific Conf. «Gagarin Readings-2017»*. Moscow: MAI, 2017, p. 435.
6. Trapeznikov A.V., Vlasova K.A., Reshetnikov Yu.V. Tableted modifiers for cast aluminum alloys. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 22, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-14-24.
7. Zhang Y., Rong W., Wu Y. et al. A detailed HAADF-STEM study of precipitate evolution in Mg–Gd alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 777, pp. 531–543. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.10.193.
8. *Fireproof high-strength casting magnesium alloy*: pat. 2753660 Rus. Federation; appl. 02.11.20; publ. 20.08.02.
9. Yarovaya E.I., Leushin I.O., Spasskaya M.M., Larin M.A. Efficiency of foundry process control. *Chernye metally*, 2018, no. 3, pp. 29–33.
10. Korobkov K.S., Polyansky I.P. Influence of heat treatment modes on the structure and mechanical properties of magnesium alloy ML5pch castings. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2022, no. 4 (43), pp. 397–398.
11. Trofimov N.V., Leonov A.A. Study of the influence of alloying elements (Nb and Ti) on the impurity content and mechanical properties of high-strength magnesium alloy of the Mg–Zn–Zr system. *Metally*. 2020, no. 3, pp. 14–18.
12. Fomina M.A., Zakharov K.E., Yamshchikov E.I., Trofimov N.V. Selection and research of optimal paste formulation for local removal of corrosion products from magnesium alloys as well as the technology of it's application. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-45-54.

13. Du Z., Peng Y., Teng H. et al. Formation and growth of precipitates in a Mg–7Gd–5Y–1Nd–2Zn–0.5Zr alloy aged at 200 °C. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, vol. 11, no. 3, pp. 2326–2339. DOI: 10.1016/j.jma.2022.10.012.
14. Mukhina I.Yu. Fundamentals of the technology of smelting magnesium alloys in protective environments. *Liteynoe proizvodstvo*, 2021, no. 1, pp. 2–8.
15. Shalomeev V.A. Modification of magnesium alloy MI-5 during filtration through carbon-containing materials. *Konstruksionnye materialy*, 2008, no. 2, pp. 198–201.
16. Moiseev K.V., Smykov A.F., Berezhnoy D.V. Automated design of a feed system for large-sized case castings made of light alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2011, no. 1, pp. 69–72.
17. Bobryshev B.L., Moiseev V.S., Aleksandrova Yu.P. Improving the complex processing of magnesium alloys during melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2021, no. 3, pp. 35–44.

#### Информация об авторах

**Трофимов Николай Вадимович**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Леонов Александр Андреевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Дуюнова Виктория Александровна**, начальник НИО, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Токарев Максим Сергеевич**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Nikolay V. Trofimov**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexander A. Leonov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Victoria A. Dyunova**, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Maxim S. Tokarev**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.11.2024.  
The article was submitted 07.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 14.11.2024.

Научная статья

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-70-80

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16ч-АТ

В.И. Постнов<sup>1</sup>, М.В. Постнова<sup>1</sup>, В.В. Антипов<sup>1</sup>, Е.А. Вешкин<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.** Опыт применения металлополимерных композиционных материалов (МПКМ) показывает, что данные материалы имеют большую выносливость, чем традиционные алюминиевые сплавы. Рассмотрены результаты сравнительных испытаний по определению упругодемпфирующих свойств разных видов МПКМ и сплава Д16. Проведенные исследования показали, что значения модуля упругости и коэффициента Пуассона исследуемых образцов панелей МПКМ практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций и близки к значениям для сплава Д16. Демпфирующая способность незначительно зависит от структуры МПКМ и логарифмический декремент колебаний равен 5 %, при этом у сплава Д16 он не превышает 0,6 %.

**Ключевые слова:** металлополимеры, сплав, прочность, деформация, нагружение, упругость

**Для цитирования:** Постнов В.И., Постнова М.В., Антипов В.В., Вешкин Е.А. Исследование динамических характеристик образцов из металлополимерных материалов и алюминиевого сплава Д16ч-АТ // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-70-80.

Scientific article

## STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SAMPLES FROM METAL-POLYMERIC MATERIALS AND ALUMINIUM ALLOY D16ch-AT

V.I. Postnov<sup>1</sup>, M.V. Postnova<sup>1</sup>, V.V. Antipov<sup>1</sup>, E.A. Veshkin<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.** The experience of metal-polymeric composite materials (MPCM) application shows that these materials have a higher durability than traditional aluminum alloys. The article considers results of comparative tests for determination of the elastically damping properties of different types of MPCM and alloy D16. The studies show that the modulus of elasticity and Poisson's coefficient of the tested MPCM panels are practically independent of the load level in the studied range of relative deformations and close to the values of alloy D16. The damping capacity is slightly dependent on the MPCM structure and logarithmic oscillation decrement is 5 %, while it does not exceed 0,6 % in the alloy D16.

**Keywords:** metalpolymers, alloy, strength, deformation, loading, elasticity

**For citation:** Postnov V.I., Postnova M.V., Antipov V.V., Veshkin E.A. Study of dynamic characteristics of samples from metal-polymeric materials and aluminium alloy D16ch-AT. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-4-70-80.

### Введение

Важность применения композитов в элементах конструкций летательных аппаратов связана с необходимостью улучшения их тактико-технических характеристик, таких как надежность, ресурс и т. п. [1, 2]. Это объясняется тем, что ряд композитов обладает более высокими по сравнению с традиционно применяемыми металлами (например, алюминиевыми сплавами) удельными механическими свойствами: модулем упругости, демпфирующей способностью, выносливостью и т. д. Именно к таким материалам относятся и металлополимерные композиционные материалы (МПКМ) [3, 4]. Кроме того, часто необходимо осуществить ремонт и модернизацию самолетного парка для продления ресурса эксплуатации воздушных судов. В этом случае применение современных МПКМ взамен алюминиевых сплавов становится единственным выходом в сложившейся ситуации.

Как показывает практика, МПКМ, состоящие из слоев алюминиевых сплавов и полимерных композитов, имеют большую выносливость, чем традиционные алюминиевые сплавы [5, 6]. Это объясняется тем, что трещины в алюминиевых слоях, зародившиеся из-за динамических нагрузок в конструкции, как правило, прекращают свое интенсивное развитие благодаря слоям полимерных композитов. Вместе с тем известно, что ~60 % авиационных аварий, обусловленных техническими причинами, связано именно с вибрационным нагружением в диапазоне относительных деформаций  $(50-200) \cdot 10^{-5}$ , а значит и с выносливостью применяемых в конструкции летательных аппаратов материалов.

Однако применение новых материалов требует знания их физико-механических характеристик (модуля упругости, демпфирующих свойств, выносливости), которые необходимы конструкторам при создании новой техники. Определение таких характеристик возможно путем испытаний образцов новых материалов, так как их практически невозможно получить при эксплуатации изделия в целом. Причем условия испытаний образцов должны быть максимально приближены к условиям нагружения материала при эксплуатации в составе изделия. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию зависимости динамического модуля упругости, логарифмического декремента колебаний и коэффициента Пуассона при изгибном нагружении образцов от уровня относительных деформаций и структуры МПКМ. Диапазон частот нагружения образцов составлял 500–1000 Гц, уровень относительных деформаций изменялся от  $50 \cdot 10^{-5}$  до  $250 \cdot 10^{-5}$  [7–10]. Именно в этих диапазонах частот и относительных деформаций и работает материал обшивки самолета. Такие испытания позволяют выбрать рациональные структуры МПКМ с точки зрения обеспечения необходимой жесткости и демпфирования натурных обшивок самолета, разработать технологию их изготовления и существенно сократить сроки доводки изделия. Однако методы испытаний образцов из композитов при таких условиях нагружения недостаточно разработаны, чем и определяется актуальность данной тематики.

Поэтому в данной работе представлены: методика определения упругодемпфирующих свойств образцов из МПКМ при высокочастотных изгибных колебаниях и высоких уровнях относительных деформаций; оборудование для осуществления таких испытаний; методика проведения испытаний образцов из натурных панелей с различной структурой, а также разработка рациональных, с точки зрения использования в реальных конструкциях, структур материала панелей.

Для осуществления данной задачи выбрана методика определения упругодемпфирующих свойств МПКМ при резонансных изгибных колебаниях образцов по основной

форме, подвешенных на струнах в узловых линиях. Для возбуждения резонансных колебаний в образцах, использовали воздушный вибровозбудитель колебаний. С помощью этой методики проведены испытания образцов натуральных панелей из МПКМ. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

Методы измерения модулей упругости материалов весьма разнообразны. Они отличаются друг от друга характером механического воздействия на образец, видом возникающего в образце деформированного и напряженного состояния, родом наблюдаемых в эксперименте величин, типом применяемой аппаратуры [11, 12].

В области звуковых частот ( $10^2$ – $3 \cdot 10^4$  Гц) применяют методы, отличительной чертой которых является отсутствие специальной инерционной системы, связанной с образцом. В данном случае (в особенности для материалов с высоким внутренним трением) наиболее удобным и точным оказывается резонансный способ. Он заключается в том, что в образце возбуждают резонансные колебания и по значению собственной частоты колебаний образца определяют динамический модуль упругости.

Используемый в данной работе метод определения динамического модуля упругости основан на замере частоты колебаний образца, которые возбуждаются модулированной струей сжатого воздуха. Блок-схема и внешний вид установки для испытаний приведены на рис. 1. Установка предназначена для испытаний материалов при комнатной температуре на частотах  $\sim(10^2$ – $10^4)$  Гц в широком диапазоне амплитуд колебаний.

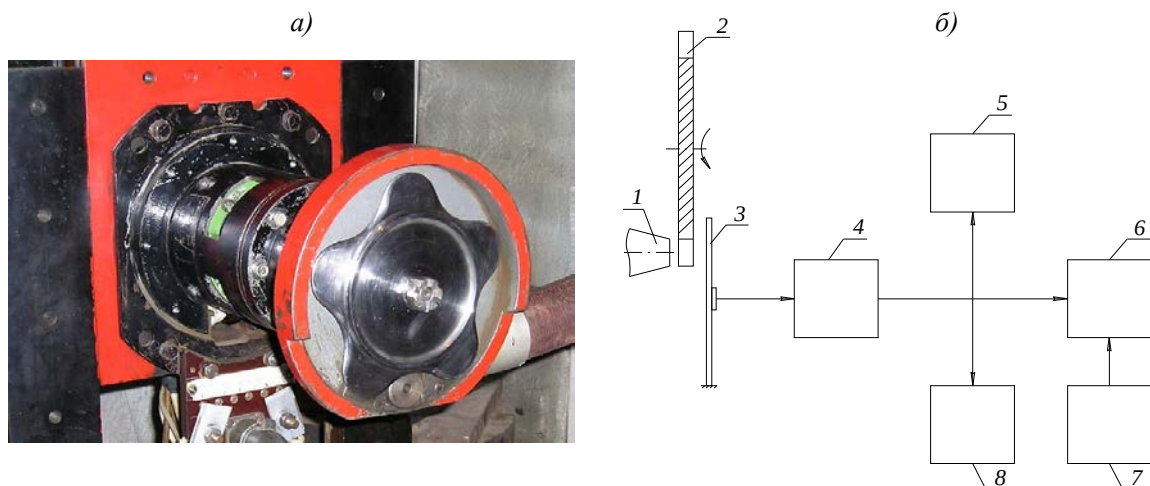


Рис. 1. Внешний вид (а) и блок-схема (б) установки для резонансных испытаний композиционных материалов: 1 – сопло; 2 – модулирующий диск; 3 – объект испытаний; 4 – тензоусилитель; 5 – прибор контроля относительной деформации; 6 – электронный осциллограф; 7 – звуковой генератор; 8 – частотомер

Для испытаний использовали призматические образцы в виде стержней размером  $80 \times 20 \times (1 \div 2,5)$  (возможны и другие размеры образцов). Стержень подвешивают на гибких струнах (в специальном приспособлении – рис. 2) в узловых линиях основной формы изгибных колебаний стержня со свободными концами, расположенными на расстоянии  $0,224l$  от торцов стержня. Схема крепления образцов и форма их колебаний представлены на рис. 3.

Вычисление динамического модуля упругости (в Па) производят по соотношению

$$E = \frac{48 \cdot \pi^2 \cdot \rho}{k^4} \cdot \frac{l^4}{h^2} \cdot f^2, \quad (1)$$

где  $l$  и  $h$  – длина и толщина стержня, м;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $k = 4,73$  – корень характеристического уравнения частот;  $f$  – собственная частота колебаний, измеряемая экспериментально, Гц.

Для более точного определения динамического модуля упругости необходимо закреплять образец строго в узловых линиях основной формы изгибных колебаний и точно измерять собственную частоту колебаний стержня, поэтому ее замер производили электронным частотомером, который позволяет измерять частоту с точностью до 0,1 Гц.

Коэффициент Пуассона определяют как отношение продольных и поперечных деформаций при колебаниях стержня, измеряемых тензодатчиками. Для увеличения точности определения коэффициента Пуассона использовали тензодатчики из фольги.

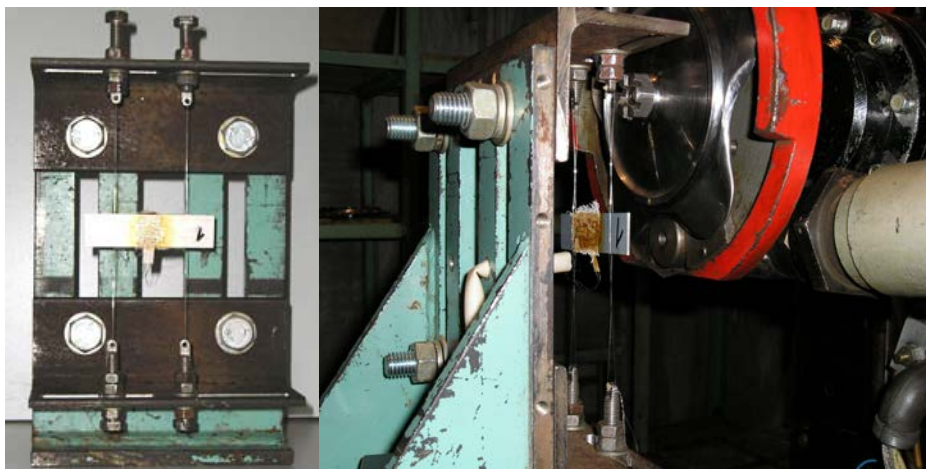


Рис. 2. Крепление образцов в приспособлении

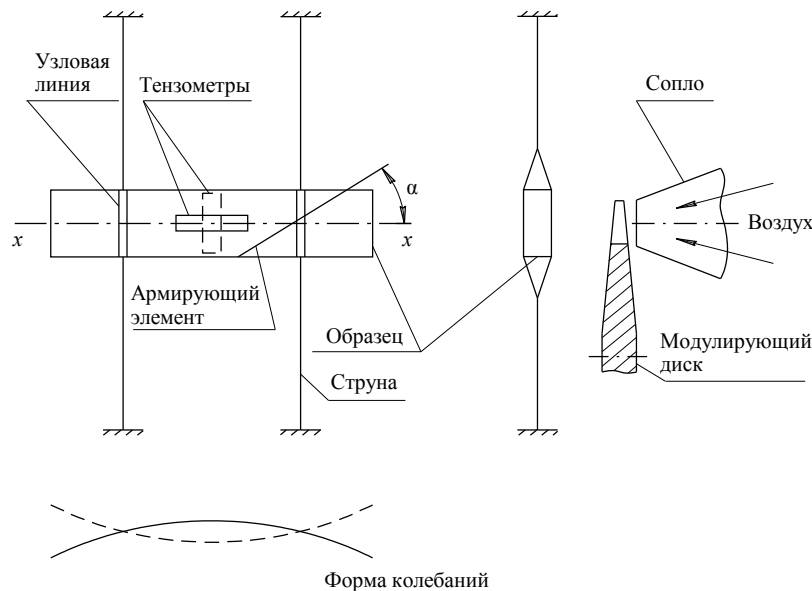


Рис. 3. Схема крепления образцов и форма колебаний

Для определения внутреннего трения в материале в широком диапазоне частот нагружения и амплитуд напряжений наиболее приемлемым является способ оценки

внутреннего трения по относительной ширине резонансной кривой, который и использовали при проведении исследований [13–15].

В качестве параметра, характеризующего рассеяние энергии в материале, принят логарифмический декремент колебаний ( $\delta$ ), который определяют по ширине резонансной кривой при изгибных колебаниях стержня со свободными концами, подвешенного на струнах в узловых линиях. Подвеска на струнах практически полностью исключает влияние условий закрепления на рассеяние энергии при колебаниях стержня и обеспечивает высокую точность и стабильность результатов экспериментов (рис. 1–3).

Расчетное соотношение для определения  $\delta$  имеет вид

$$\delta = \frac{\pi \cdot \Delta f}{f}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – декремент колебаний;  $f$  – резонансная частота;  $\Delta f$  – ширина резонансной кривой, соответствующая относительным деформациям, равным 0,707 от максимальной величины.

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены геометрические размеры ( $l_{\max}$  – максимальная длина;  $h_{\text{ср}}$ ,  $b_{\text{ср}}$  – средняя толщина и ширина стержня), масса и структура образцов для определения упругодемпфирующих свойств МПКМ.

Таблица 1

Характеристики исследуемых образцов

| Условный номер образца | Материал (угол $\alpha$ – см. рис. 3)                                   | $l_{\max}$ , мм | $h_{\text{ср}}$ , мм | $b_{\text{ср}}$ , мм | Масса, г | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------|----------------------------|
| 0.1                    | Д16ч-АТ                                                                 | 79,85           | 20,10                | 1,17                 | 5,06     | 2706,16                    |
| 0.2                    | Д16ч-АТ                                                                 | 79,80           | 20,10                | 1,17                 | 5,00     | 2664,31                    |
| 1.1                    | СИАЛ-1-2/1-1,25 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                               | 80,20           | 20,20                | 1,30                 | 5,10     | 2421,59                    |
| 2.1                    | СИАЛ-3-2/1-1,25 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                               | 80,20           | 20,10                | 1,29                 | 5,03     | 2428,26                    |
| 3.1                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                                  | 80,20           | 20,10                | 1,48                 | 5,69     | 2384,95                    |
| 3.2                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                                  | 80,10           | 20,15                | 1,53                 | 5,70     | 2308,21                    |
| 4.1                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 15^\circ$ )                                 | 80,15           | 20,10                | 1,48                 | 5,71     | 2394,83                    |
| 5.1                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 30^\circ$ )                                 | 79,90           | 20,15                | 1,48                 | 5,71     | 2394,83                    |
| 6.1                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 45^\circ$ )                                 | 80,45           | 20,10                | 1,45                 | 5,66     | 2422,29                    |
| 6.2                    | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 45^\circ$ )                                 | 80,20           | 20,05                | 1,47                 | 5,64     | 2394,16                    |
| 7.1                    | АЛОП-2/1-1,8 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , растяжение 0,6 %)                | 79,90           | 20,05                | 1,95                 | 7,23     | 2314,42                    |
| 8.1                    | АЛОП-3/2-2,4 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , покрытие Ан.Окс. сернокислотное) | 80,15           | 20,08                | 2,45                 | 8,94     | 2267,27                    |
| 9.1                    | СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                                | 80,25           | 20,13                | 1,41                 | 5,23     | 2296,69                    |
| 10.1                   | СИАЛ-1-3/2-1,4 мм ( $\alpha = 90^\circ$ )                               | 79,65           | 20,20                | 1,38                 | 5,18     | 2332,99                    |
| 11.1                   | АЛОП-2/1-1,25 мм ( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 2,5 %)              | 80,40           | 20,10                | 1,22                 | 4,64     | 2353,46                    |
| 11.2                   | АЛОП-2/1-1,25 мм ( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 2,5 %)              | 80,60           | 19,80                | 1,21                 | 4,50     | 2330,38                    |
| 12.1                   | АЛОП-2/1-1,25 мм ( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 3 %)                | 80,25           | 20,38                | 1,30                 | 4,80     | 2258,16                    |
| 13.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 45^\circ$ , растяжение 8 %)                 | 80,05           | 20,20                | 1,41                 | 5,47     | 2399,14                    |
| 14.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 45^\circ$ , растяжение 13 %)                | 80,40           | 20,15                | 1,39                 | 5,42     | 2406,87                    |
| 15.1                   | СИАЛ-1-3/2-1,25 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , влага 12 сут)                 | 80,40           | 20,33                | 1,24                 | 5,02     | 2477,40                    |
| 16.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , влага 3 сут)                     | 80,25           | 20,18                | 1,47                 | 5,64     | 2377,84                    |
| 17.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , влага 12 сут)                    | 80,20           | 20,25                | 1,43                 | 5,60     | 2411,31                    |
| 18.1                   | СИАЛ-2-3/2-1,8 мм ( $\alpha = 0^\circ$ )                                | 82,50           | 20,60                | 1,91                 | 7,00     | 2156,47                    |

Для проведения испытаний на образцы МПКМ наклеивали тензометры с базой 5 мм. Уровень максимальных относительных деформаций измеряли с помощью датчика,

наклеенного вдоль оси образца; коэффициент Пуассона определяли с помощью датчика, наклеенного в ортогональном направлении; логарифмический декремент колебаний определяли по ширине резонансной кривой на уровне  $0,707\varepsilon_{\max}$ . Характерный вид резонансной кривой для исследуемых образцов представлен на рис. 4.

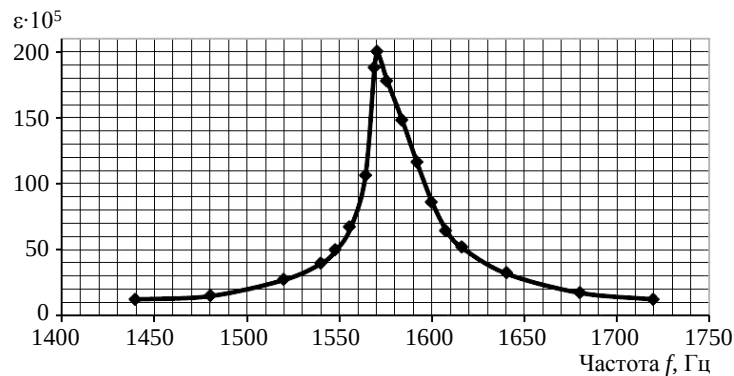


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика образца 7.1 АЛОР-2/1-1,8 мм ( $\alpha = 0^\circ$ , растяжение 0,6 %)

Результаты исследования упругодемпфирующих характеристик представлены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 5–7 (где  $\varepsilon$  – амплитуда относительной деформации;  $f_p$  – резонансная частота;  $f_{\max}$  – верхняя частота, соответствующая  $0,707\varepsilon_{\max}$ ;  $f_{\min}$  – нижняя частота, соответствующая  $0,707\varepsilon_{\min}$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\delta$  – логарифмический декремент колебаний).

Таблица 2

Упругодемпфирующие характеристики

| Условный номер образца | Вид образца                                  | $\varepsilon \cdot 10^5$ | $f_p$ , Гц | $f_{\max}$ , Гц | $f_{\min}$ , Гц | $E$ , ГПа | $\mu$ | $\delta$ , % |
|------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|------------|-----------------|-----------------|-----------|-------|--------------|
| 0.1                    | Д16ч-АТ                                      | 50                       | 951,00     | 952,20          | 949,8           | 69,38     | 0,296 | 0,4          |
|                        |                                              | 100                      | 948,50     | 950,00          | 945,00          | 69,02     | 0,296 | 0,5          |
|                        |                                              | 150                      | 933,25     | 935,03          | 931,47          | 66,81     | –     | 0,6          |
| 0.2                    | Д16ч-АТ                                      | 50                       | 956,50     | 957,41          | 955,58          | 68,33     | –     | 0,3          |
|                        |                                              | 100                      | 943,25     | 944,75          | 941,75          | 66,45     | –     | 0,5          |
|                        |                                              | 150                      | 926,75     | 928,52          | 924,98          | 64,15     | –     | 0,6          |
| 1.1                    | СИАЛ-1-2/1-1,25 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ ) | 50                       | 1100,50    | 1102,00         | 1099,00         | 67,96     | –     | 0,86         |
|                        |                                              | 100                      | 1100,25    | 1101,50         | 1098,50         | 67,93     | –     | 0,86         |
|                        |                                              | 150                      | 1099,00    | 1102,00         | 1096,50         | 67,78     | –     | 1,57         |
| 2.1                    | СИАЛ-3-2/1-1,25 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ ) | 50                       | 1083,00    | 1088,00         | 1081,25         | 67,53     | 0,296 | 1,96         |
|                        |                                              | 100                      | 1083,00    | 1086,50         | 1079,50         | 67,53     | 0,296 | 2,03         |
|                        |                                              | 150                      | 1083,75    | 1087,75         | 1082,00         | 67,62     | 0,292 | 1,67         |
|                        |                                              | 200                      | 1082,25    | –               | –               | 67,44     | –     | –            |
| 3.1                    | АЛОР-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ )    | 50                       | 1245,25    | 1250,00         | 1241,50         | 66,11     | 0,296 | 2,14         |
|                        |                                              | 100                      | 1246,75    | 1251,25         | 1242,75         | 66,27     | –     | 2,14         |
|                        |                                              | 150                      | 1243,25    | 1250,25         | 1237,75         | 65,90     | –     | 3,16         |
| 3.2                    | АЛОР-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ )    | 50                       | 1249,25    | 1251,00         | 1246,75         | 59,95     | 0,296 | 1,07         |
|                        |                                              | 100                      | 1248,50    | 1251,50         | 1245,25         | 59,88     | 0,296 | 1,57         |
|                        |                                              | 150                      | 1245,75    | 1251,00         | 1241,75         | 59,61     | 0,312 | 2,33         |
| 4.1                    | АЛОР-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 15^\circ$ )   | 50                       | 1235,00    | 1239,00         | 1228,00         | 65,14     | 0,345 | 2,80         |
|                        |                                              | 100                      | 1228,00    | 1231,75         | 1220,00         | 64,40     | 0,320 | 3,01         |
|                        |                                              | 150                      | 1225,00    | 1230,75         | 1221,00         | 64,09     | –     | 2,50         |
| 5.1                    | АЛОР-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 30^\circ$ )   | 50                       | 1240,75    | 1246,00         | 1237,25         | 58,75     | 0,246 | 2,22         |
|                        |                                              | 100                      | 1239,00    | 1243,00         | 1235,25         | 58,59     | 0,271 | 1,97         |
|                        |                                              | 150                      | 1232,75    | 1241,75         | 1228,75         | 58,00     | 0,263 | 3,31         |

| Условный номер образца | Вид образца                                                                 | $\varepsilon \cdot 10^5$ | $f_p$ , Гц | $f_{max}$ , Гц | $f_{min}$ , Гц | $E$ , ГПа | $\mu$ | $\delta$ , % |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|----------------|----------------|-----------|-------|--------------|
| 6.1                    | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 45^\circ$ )                                  | 50                       | 1201,50    | 1207,50        | 1196,50        | 66,39     | 0,286 | 2,88         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1202,50    | 1209,75        | 1197,75        | 66,50     | 0,296 | 3,14         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1202,25    | 1211,25        | 1196,50        | 66,47     | 0,263 | 3,85         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1199,00    | 1210,25        | 1192,25        | 66,11     | –     | 4,72         |
| 6.2                    | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 45^\circ$ )                                  | 50                       | 1264,50    | 1268,00        | 1262,00        | 69,84     | 0,345 | 1,49         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1263,50    | 1267,00        | 1260,50        | 69,73     | 0,345 | 1,62         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1260,25    | 1268,50        | 1255,50        | 69,37     | 0,345 | 3,24         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1255,50    | 1268,00        | 1248,00        | 68,85     | –     | 5,00         |
| 7.1                    | АЛОП-2/1-1,8 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ , растяжение 0,6 %)                 | 50                       | 1585,60    | 1590,00        | 1581,60        | 59,02     | 0,335 | 1,66         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1584,80    | 1590,00        | 1580,80        | 58,96     | 0,330 | 1,82         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1581,60    | 1590,00        | 1574,40        | 58,72     | 0,345 | 3,10         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1570,40    | 1586,80        | 1564,80        | 57,89     | 0,345 | 4,40         |
| 8.1                    | АЛОП-3/2-2,4 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ , покрытие Ан.Окс. серноокислотное) | 50                       | 2021,60    | 2028,40        | 2014,80        | 60,29     | 0,296 | 2,11         |
|                        |                                                                             | 100                      | 2018,40    | 2025,20        | 2012,40        | 60,10     | 0,296 | 1,99         |
|                        |                                                                             | 150                      | 2012,80    | 2020,40        | 2007,20        | 59,76     | 0,296 | 2,06         |
| 9.1                    | СИАЛ-1-3/2-1,4 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ )                                 | 50                       | 1189,00    | 1193,00        | 1185,25        | 64,09     | 0,276 | 2,05         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1189,75    | 1195,00        | 1186,25        | 64,17     | 0,271 | 2,31         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1189,00    | 1194,00        | 1185,50        | 64,09     | –     | 2,25         |
| 10.1                   | СИАЛ-1-3/2-1,4 мм<br>( $\alpha = 90^\circ$ )                                | 50                       | 1116,25    | 1121,25        | 1111,25        | 58,15     | 0,296 | 2,81         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1114,75    | 1120,50        | 1110,00        | 57,99     | 0,271 | 2,96         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1115,25    | 1121,75        | 1111,50        | 58,04     | 0,263 | 2,89         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1115,25    | 1121,00        | 1108,25        | 58,04     | 0,271 | 3,59         |
| 11.1                   | АЛОП-2/1-1,25 мм<br>( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 2,5 %)               | 50                       | 1069,75    | 1074,75        | 1066,50        | 71,58     | 0,296 | 2,42         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1069,00    | 1071,75        | 1065,75        | 71,48     | 0,296 | 1,76         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1067,50    | –              | –              | 71,28     | –     | –            |
| 11.2                   | АЛОП-2/1-1,25 мм<br>( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 2,5 %)               | 50                       | 1055,00    | 1059,25        | 1051,75        | 70,75     | 0,296 | 2,23         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1055,75    | 1059,75        | 1052,00        | 70,85     | 0,296 | 2,31         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1056,50    | 1059,75        | 1053,50        | 70,95     | –     | 1,86         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1056,00    | 1060,00        | 1052,25        | 70,88     | –     | 2,31         |
| 12.1                   | АЛОП-2/1-1,25 мм<br>( $\alpha = 90^\circ$ , растяжение 3 %)                 | 50                       | 1144,75    | 1148,25        | 1139,00        | 68,73     | 0,276 | 2,54         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1143,25    | 1148,00        | 1138,25        | 68,55     | 0,271 | 2,68         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1140,75    | 1148,50        | 1136,25        | 68,25     | 0,273 | 3,37         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1139,50    | –              | –              | 68,10     | 0,271 | –            |
| 13.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 45^\circ$ , растяжение 8 %)                  | 50                       | 1201,50    | 1204,50        | 1198,75        | 67,70     | 0,296 | 1,50         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1201,75    | 1205,25        | 1198,00        | 67,73     | 0,296 | 1,90         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1200,50    | 1205,50        | 1196,00        | 67,59     | 0,279 | 2,49         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1199,00    | 1203,00        | 1189,75        | 67,42     | 0,296 | 3,47         |
| 14.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 45^\circ$ , растяжение 13 %)                 | 50                       | 1186,25    | 1189,50        | 1182,75        | 69,33     | 0,296 | 1,79         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1185,00    | 1189,75        | 1182,50        | 69,18     | 0,320 | 1,92         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1185,00    | 1189,75        | 1179,50        | 69,18     | 0,329 | 2,72         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1180,50    | 1190,50        | 1175,25        | 68,66     | 0,276 | 4,06         |
| 15.1                   | СИАЛ-1-3/2-1,25 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ , влага 12 сут)                  | 50                       | 1037,50    | 1040,75        | 1034,00        | 68,58     | 0,296 | 2,04         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1035,75    | 1040,50        | 1030,00        | 68,35     | 0,296 | 3,18         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1037,00    | 1042,00        | 1031,00        | 68,51     | 0,296 | 3,33         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1034,75    | –              | –              | 68,21     | –     | –            |
| 16.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ , влага 3 сут)                      | 50                       | 1228,50    | 1234,25        | 1222,25        | 65,64     | 0,296 | 3,07         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1228,00    | 1233,25        | 1224,00        | 65,59     | 0,296 | 2,37         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1224,50    | 1233,25        | 1219,50        | 65,21     | 0,279 | 3,53         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1224,75    | 1236,00        | 1217,00        | 65,24     | 0,271 | 4,87         |
| 17.1                   | АЛОП-2/1-1,5 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ , влага 12 сут)                     | 50                       | 1228,00    | 1229,75        | 1225,25        | 69,62     | 0,296 | 1,15         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1228,25    | 1230,25        | 1225,00        | 69,65     | 0,296 | 1,34         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1227,00    | 1230,75        | 1223,75        | 69,50     | 0,296 | 1,79         |
| 18.1                   | СИАЛ-2-3/2-1,8 мм<br>( $\alpha = 0^\circ$ )                                 | 50                       | 1468,80    | 1471,20        | 1466,00        | 55,93     | 0,296 | 1,11         |
|                        |                                                                             | 100                      | 1469,20    | 1471,20        | 1466,40        | 55,96     | 0,271 | 1,03         |
|                        |                                                                             | 150                      | 1468,40    | 1470,80        | 1466,00        | 55,90     | –     | 1,03         |
|                        |                                                                             | 200                      | 1466,80    | 1470,40        | 1464,80        | 55,77     | –     | 1,20         |

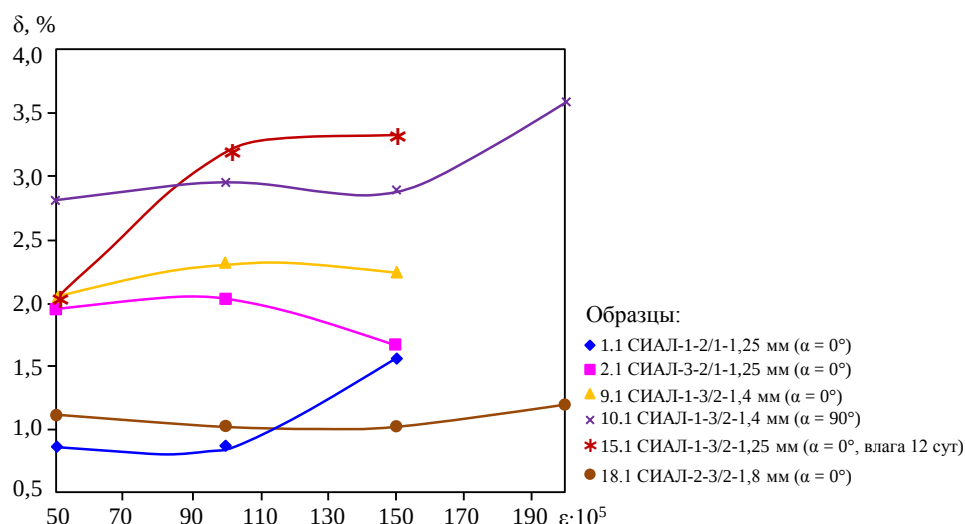


Рис. 5. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов СИАЛ с разной структурой

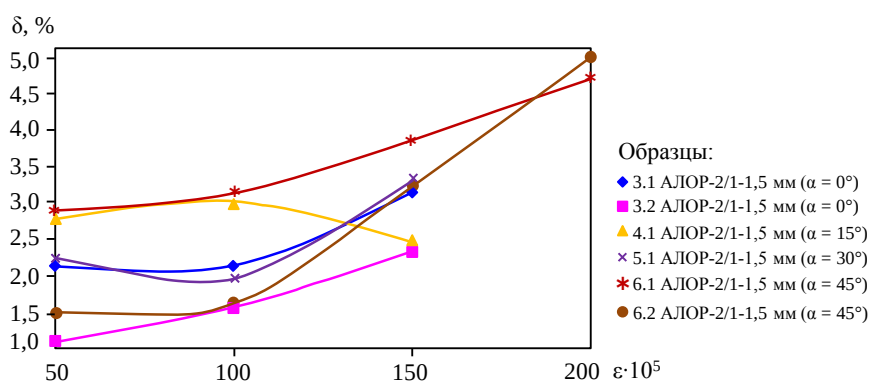


Рис. 6. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов АЛОП-2/1-1,5 с разной укладкой

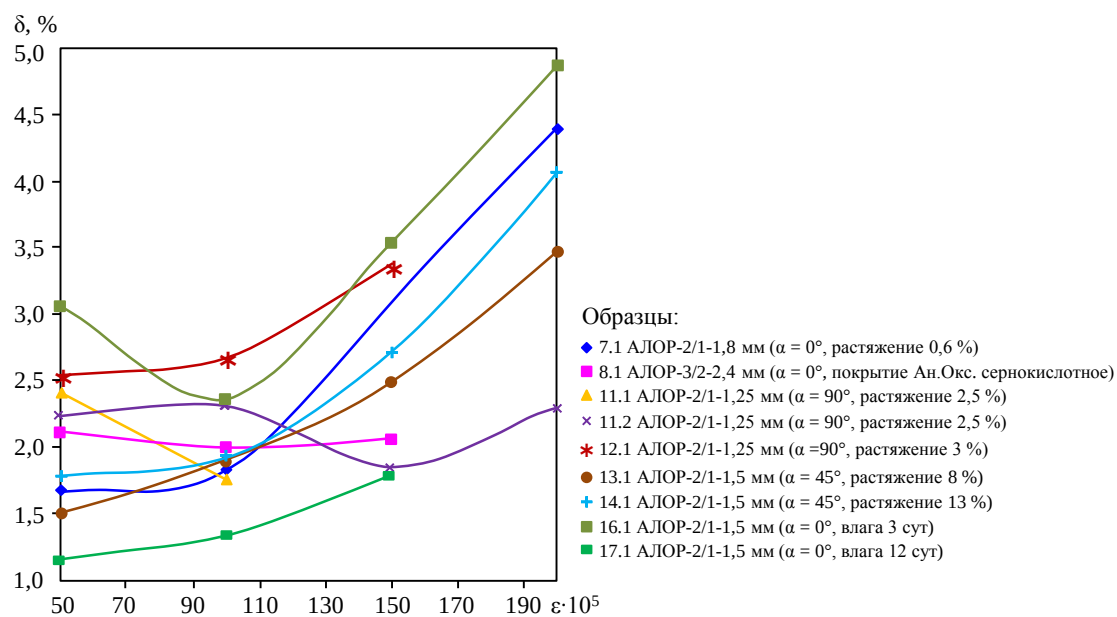


Рис. 7. Изменение логарифмического декремента колебаний для композитов АЛОП с разной структурой

Анализ результатов испытаний показывает, что значения динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона для исследуемых образцов панелей МПКМ находятся в диапазонах  $E = (5,50-7,2) \cdot 10^{10}$  Па и  $\mu = 0,24-0,35$ , практически не зависят от уровня нагружения в исследуемом диапазоне относительных деформаций  $((50-200) \cdot 10^{-5})$  и близки к значениям модуля упругости и коэффициента Пуассона для деформируемого алюминиевого сплава Д16ч-АТ (табл. 2). Демпфирующая способность (логарифмический декремент колебаний) незначительно зависит от структуры МПКМ и в исследуемом диапазоне изменения относительных деформаций не превышают 5 %. Это объясняется тем, что композит находится вблизи нейтрального слоя и при изгибных колебаниях образцов практически не участвует в рассеянии энергии. В то же время логарифмический декремент колебаний сплава Д16 не превышает 0,6 %.

### Заключения

В результате исследований выявлено:

- разброс значений динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона обусловлен структурными особенностями образцов, т. е. соотношением доли композита и алюминиевого сплава и содержанием клеевой матрицы в составе композитного слоя;
- в исследуемом диапазоне изменения относительных деформаций логарифмический декремент колебаний в зависимости от структуры МПКМ составил от 1 до 5 %.

Для образцов из МПКМ установлено:

- при изменении угла вырезки образца от 0 до 45 градусов к оси армирования величина декремента увеличивается на 1,5–2 %;
- уровень остаточной деформации (от 0 до 3 %) в предварительно растянутых образцах незначительно влияет на величину декремента;
- термовлажностное воздействие также незначительно влияет на величину декремента.

Логарифмический декремент колебаний образцов из сплава Д16ч-АТ не превышает 0,6 %.

В дальнейшем необходимо провести исследования выносливости МПКМ с целью выявления их преимуществ по сопротивлению усталости по сравнению с алюминиевыми деформируемыми сплавами.

Необходимо продолжить исследования динамической прочности (выносливости и демпфирования) элементов натуральных конструкций планера самолета из МПКМ (фрагментов заклепочных соединений и т. д.) при высокочастотном динамическом нагружении.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. № 2. С. 41–46.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
3. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлотеклопластика класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
4. Дуюнова В.А., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Сидельников В.В., Сомов А.В. Методы формообразования металлополимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.

5. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
6. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Гриневич А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
8. Железина Г.Ф. Трещиностойкие металлоорганопластики для авиационных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 1996. 32 с.
9. Лавро Н.А., Барабаш В.Н., Ефимов В.А. Прогнозирование срока службы и ресурса самолетных крупногабаритных обтекателей РЛС из полимерных композиционных материалов // Сб. докл. VII Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2008»: в 2 ч. Геленджик, 2008. Ч. 1. С. 353–360.
10. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Аниховская Л.И. Клеевые препреги для слоистых алюмокомпозитов класса СИАЛ // *Труды ВИАМ*. 2014. № 1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5.
11. Постнов А.В., Постнов В.И., Вязкин В.Н. Упругодемпфирующие свойства металлополимерных композитов при высокочастотном нагружении // *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*. 2011. № 3. С. 80–87.
12. Загребалов А.А., Кишкина С.И. Остаточные напряжения и выносливость композиционных материалов // *Вопросы авиационной науки и техники*. Сер.: *Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 1990. С. 87–93.
13. Грабильников А.С., Машинская Г.П., Железина Г.Ф., Зиневич О.М., Деев И.С. Межслойная трещиностойкость гибридного композиционного материала алор // *Механика композиционных материалов*. 1990. Т. 30. № 2. С. 196–206.
14. Нестеренко Г.И. Остаточная прочность подкрепленных конструкций с обширными и многоочаговыми усталостными повреждениями // *Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений*. М.: ЦАГИ, 2002. С. 112–117.
15. Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В. и др. Сопротивление усталости и особенности разрушения листовых алюмокомпозитов // Тез. докл. Междунар. конф. «Слоистые композиционные материалы – 98». Волгоград: ВГТУ, 1998. С. 86–88.

#### References

1. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovations, technological leadership and national security of Russia. *Intellect & Tekhnologii*, 2016, no. 2, pp. 41–46.
2. Kablov E.N. Aerospace materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
3. Duyunova V.A., Kutyrev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
4. Duyunova V.A., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Sidelnikov V.V., Somov A.V. Methods of forming metal-polymer composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
5. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.

6. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Grinevich A.V., Rumyantsev Yu.S., Morozova L.V., Terehin A.L. Study of fatigue life of 1163-T and V950.ch.-T2 aluminum alloys after surface hardening. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S4, pp. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
8. Zhelezina G.F. *Crack-resistant metal-organoplastics for aircraft structures*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 1996, 32 p.
9. Lavro N.A., Barabash V.N., Efimov V.A. Forecasting the service life and resource of large-sized aircraft radar radomes made of polymer composite materials. *VII Int. Scientific Conf. on Hydroaviation «Gidroaviasalon-2008»: in 2 parts*. Gelendzhik, 2008, part 1, pp. 353–360.
10. Lukina N.F., Dementeva L.A., Anikhovskaya L.I. Adhesive prepregs for laminated aluminum glass plastics (SIAL). *Trudy VIAM*, 2014, no. 1, paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5.
11. Postnov A.V., Postnov V.I., Vyakin V.N. Elastic-damping properties of metal-polymer composites under high-frequency loading. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva*, 2011, no. 3, pp. 80–87.
12. Zagrebalo A.A., Kishkina S.I. Residual stresses and fatigue of composite materials. *Issues of aviation science and technology. Ser.: Aviation materials*. Moscow: VIAM, 1990, pp. 87–93.
13. Grabilnikov A.S., Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Zinevich O.M., Deev I.S. Interlayer crack resistance of the hybrid composite material Alor. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov*, 1990, vol. 30, no. 2, pp. 196–206.
14. Nesterenko G.I. Residual strength of reinforced structures with extensive and multi-focal fatigue damage. *Strength, vibrations and resource of aircraft structures and constructions*. Moscow: TsAGI, 2002, pp. 112–117.
15. Senatorova O.G., Anikhovskaya L.I., Sidelnikov V.V. et al. Fatigue resistance and fracture features of sheet aluminum-glass plastics. *Reports Int. Conf. «Layered Composite Materials – 98»*. Volgograd: VSTU, 1998, pp. 86–88.

## Информация об авторах

**Постнов Вячеслав Иванович**, доктор технических наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Постнова Мария Вячеславовна**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Антипов Владислав Валерьевич**, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Вешкин Евгений Алексеевич**, начальник УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

## Information about the authors

**Vyacheslav I. Postnov**, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Vyacheslav V. Antipov**, Deputy Director for Science, Doctor of Sciences (Tech.) Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Evgeny A. Veshkin**, Head of UNTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.10.2024.  
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.10.2024.

Научная статья

УДК 667.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОСТАВА ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОЛНЕНИЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО АНОДНО-ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ И СПОСОБЫ ЕГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*К.Е. Захаров<sup>1</sup>, М.А. Фомина<sup>1</sup>, А.И. Вдовин<sup>1</sup>, Е.С. Чумакова<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.** Наиболее известным способом защиты от коррозии алюминия и его сплавов является сернокислотное анодное оксидирование. Оксидированная поверхность обладает высокими адгезионными свойствами и существенной способностью к сопротивлению агрессивным внешним факторам. Однако покрытие требует дополнительной обработки, называемой наполнением и заключающейся в выдержке в горячих растворах. Приводятся исследования, направленные на разработку состава и нового способа наполнения анодно-оксидного покрытия, оценивается возможность применения данного состава в качестве ингибитора коррозии.

**Ключевые слова:** анодно-оксидные покрытия, наполнение, защита от коррозии, ингибиторы коррозии

**Для цитирования:** Захаров К.Е., Фомина М.А., Вдовин А.И., Чумакова Е.С. Оценка эффективности состава для низкотемпературного наполнения сернокислотного анодно-оксидного покрытия и способы его альтернативного применения // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95.

Scientific article

## EFFICIENCY EVALUATION OF THE COMPOSITION FOR LOW-TEMPERATURE FILLING OF SULFURIC ACID ANODIC-OXIDE COATING AND METHODS OF ITS ALTERNATIVE APPLICATION

*K.E. Zakharov<sup>1</sup>, M.A. Fomina<sup>1</sup>, A.I. Vdovin<sup>1</sup>, E.S. Chumakova<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.** The most known method of protection against corrosion of aluminum and its alloys is sulfuric acid anodic oxidation. The oxidized surface has a significant ability to resist aggressive external factors, high adhesion properties. However, the coating requires an additional treatment consisting of soaking in hot solutions, called filling. The article presents the results of research aimed at the development of the composition and a new method of filling anodic-oxide coating, the possibility of using this composition as a corrosion inhibitor is evaluated.

**Keywords:** anodic-oxide coatings, filling, corrosion protection, corrosion inhibitors

**For citation:** Zakharov K.E., Fomina M.A., Vdovin A.I., Chumakova E.S. Efficiency evaluation of the composition for low-temperature filling of sulfuric acid anodic-oxide coating and methods of its alternative application. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95.

### **Введение**

К изделиям авиакосмической отрасли предъявляются повышенные требования при использовании коррозионностойких материалов. Изделия авиационной техники должны обладать высокими прочностными характеристиками при эксплуатации в различных условиях, а также сохранять высокий ресурс эксплуатации [1–3].

Алюминий относится к группе активных металлов, его стандартный равновесный потенциал составляет  $-1,67$  В. В обычных условиях алюминий может взаимодействовать с кислотами, щелочами, воздушной и водной средами. В воздушной среде алюминий имеет свойство окисляться – на его поверхности образуется тонкая оксидная пленка, которая препятствует активации коррозионных процессов, стойка в нейтральных и слабокислых растворах, однако по причине малой толщины не обеспечивает должной антикоррозионной защиты и функциональных свойств.

Наиболее известным способом защиты алюминия и его сплавов является анодное оксидирование [4–6]. Процесс протекает в стационарных ваннах при полном погружении деталей. Оксидированная поверхность обладает существенной способностью к сопротивлению агрессивным внешним факторам, а также хорошими адгезионными свойствами; может приобретать такие ценные свойства, как твердость, электроизоляционная способность и износостойкость.

Покрытие состоит из двух слоев: тонкого ( $0,2\text{--}0,3$  нм) беспористого барьерного слоя и пористого основного слоя ( $6\text{--}14$  мкм). Вследствие пористости покрытие само по себе не обладает удовлетворительной защитной способностью и требует дополнительной обработки, называемой наполнением (уплотнением) и заключающейся в выдержке в горячих растворах. Наполнение осуществляют либо в горячих растворах хроматов (что является наиболее эффективной защитой), либо в горячей дистиллированной/деминерализованной воде – данный метод дает худший эффект, однако широко применяется на тех предприятиях, где остро стоят проблемы охраны природы.

Состав марки ВИС-А [7] разработан в качестве альтернативы стандартному хроматному наполнению – сравнительные испытания в камере солевого тумана (КСТ) показали высокую защитную способность такого способа обработки серноокислотного покрытия. Причем защитная способность покрытия, наполненного при температурах  $90\text{--}95$  °С, находится на уровне покрытия, наполненного при температурах  $38\text{--}42$  °С, т. е. почти в 2 раза ниже. В данной статье отражены результаты, касающиеся решения производственных вопросов при применении разработанного состава в заводских условиях – определение истощаемости ванны наполнения с увеличением количества обрабатываемых деталей, разработка методик контроля содержания компонентов ванны, экологические аспекты.

Кроме того, в данной работе исследована возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии типовых металлических материалов – неанодированного алюминия, конструкционных сталей и меди. Результаты исследований в дальнейшем могут найти применение не только в авиационной, но и в строительной отрасли.

### **Материалы и методы**

Для исследований использовали плоские образцы размером  $100\times 50\times (1,5\div 2)$  мм из типовых алюминиевых сплавов различных систем легирования (1163-Т, В95-Т2, АК4-Т1, 1933-Т3, АМг2), а также из стали 30ХГСА и меди М1.

Оценку истощаемости раствора наполнения осуществляли по изменению внешнего вида методом капельной пробы в соответствии с ПИ 1.2.616–2022.

Оценку защитных свойств наполненного сернокислотного анодно-оксидного покрытия проводили ускоренным методом в КСТ по ГОСТ 9.301–86, ГОСТ 9.302–88, ГОСТ 9.905–82 и ГОСТ 9.308–85.

Возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии для антикоррозионной защиты определяли по ГОСТ 9.502–82 и ГОСТ 9.514–99.

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

### Результаты и обсуждение

Технологии формирования защитных покрытий на поверхности металлических материалов часто связаны с существенной экологической нагрузкой на окружающую среду и относительно высокой энергозатратностью. В частности, лучшим способом защиты от коррозии деталей из алюминиевых сплавов считается применение веществ, содержащих в составе соединения шестивалентного хрома, которые, в свою очередь, являются чрезвычайно опасными для человека и окружающей среды [8, 9].

Разработанный состав марки ВИС-А содержит в составе несколько ингибиторов коррозии в относительно малых концентрациях, однако возникающий при этом синергетический эффект позволяет использовать состав в качестве раствора для наполнения сернокислотных анодно-оксидных покрытий [10–15]. Покрытие, модифицированное данным способом, по своим защитным характеристикам не уступает наполненному по стандартной технологии покрытию. Проведенные ранее исследования защитной способности наполненных покрытий показали, что процесс возможно осуществлять при температурах 38–42 °С, что ниже стандартных температур более чем в 2 раза. Таким образом, применение данного способа наполнения анодно-оксидных покрытий на производствах (особенно с учетом объема гальванических ванн, используемых в процессе) может быть успешно внедрено. Еще одним важным фактором, влияющим на эффективность применения того или иного гальванического процесса, на практике является способность с помощью раствора или электролита формировать качественное покрытие при увеличении пропущенной через ванну суммарной площади металла, т. е. истощаемость раствора. Кроме того, большое внимание уделяется корректировке раствора, его регенерации и утилизации.

Для выполнения указанной задачи образцы с сернокислотным анодно-оксидным покрытием последовательно обрабатывали (наполняли) в 1 л водного раствора состава марки ВИС-А (концентрация выбрана в соответствии с ТУ 1-595-7–1974 на состав и обусловлена результатами ранее выполненных работ) при температурах 38–42 °С в течение 20 мин.

Качество покрытия определяли с помощью трех стандартных показателей: по показателю капельной пробы, по изменению внешнего вида анодно-оксидного покрытия, а также по внешнему виду образцов из алюминиевых сплавов с анодно-оксидным покрытием после испытания в КСТ в течение не менее 720 ч. Оценку качества наполненного покрытия осуществляли для «нулевой» точки, а также с шагом достижения суммарной площади наполненного покрытия 5 дм<sup>2</sup> в 1 л.

Определение показателя капельной пробы осуществляли следующим образом – на образец наносили 5 капель контрольного раствора следующего состава: 25 мл соляной кислоты с плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup>; 3 г двуххромовокислого калия; 75 мл дистиллированной воды. После нанесения следили за изменением цвета раствора с ярко-оранжевого до зеленого, что происходит вследствие растворения покрытия и восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного.

Оценку изменения внешнего вида осуществляли визуально.

Сравнительные испытания в КСТ проводили при непрерывном распылении 5%-ного раствора NaCl, значение pH раствора составляло от 6,5 до 7,2 при температуре испытаний 35 °С в течение 720 ч. Во время испытаний осуществляли ежесдельный контроль внешнего вида образцов для выявления момента образования первых очагов коррозии.

На рис. 1 и 2 приведены типичные фотографии образцов из сплава 1163-Т с анодно-оксидным покрытием, как наиболее показательные.

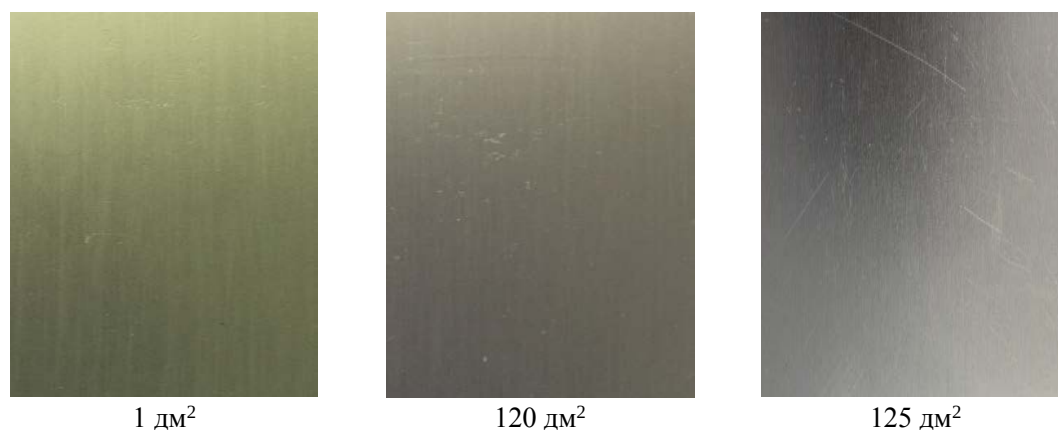


Рис. 1. Изменение цвета наполненного анодно-оксидного покрытия, полученного на сплаве 1163-Т, в зависимости от суммарной обработанной площади

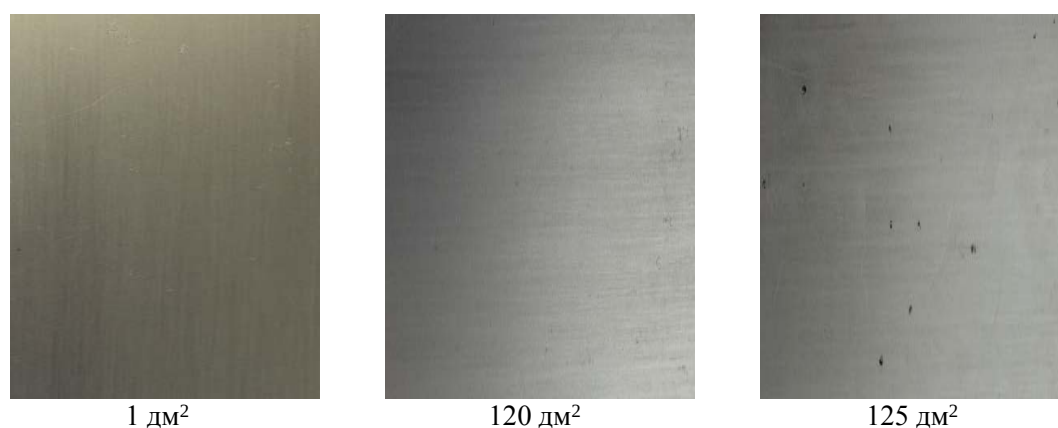


Рис. 2. Состояние поверхности после экспозиции в камере солевого тумана наполненного анодно-оксидного покрытия, полученного на сплаве 1163-Т, в зависимости от суммарной обработанной площади

Установлено, что время, требуемое для изменения цвета капли (капельная проба), для всех исследуемых сплавов уменьшается с увеличением суммарно обработанной площади покрытия (рис. 3). Аналогичная тенденция наблюдается и с изменением интенсивности цвета покрытия, однако данные изменения сами по себе не могут свидетельствовать о недостаточном качестве уплотненного покрытия. Четкая зависимость качества покрытия от общей обработанной площади поверхности наблюдается при оценке результатов испытаний в КСТ – на образцах из сплавов 1163-Т, В95-Т2, АК4-Т1, 1933-Т3 с покрытием, наполненным в растворе, в котором предварительно обработано >120 дм<sup>2</sup> поверхности (125 и 130 дм<sup>2</sup>), имеются существенные коррозионные поражения в виде массовых питтингов глубиной до 12 мкм (рис. 4 и 5). На

аналогичных образцах из сплава АМг2 коррозионные поражения отсутствуют – это объясняется более высокой коррозионной стойкостью сплава.

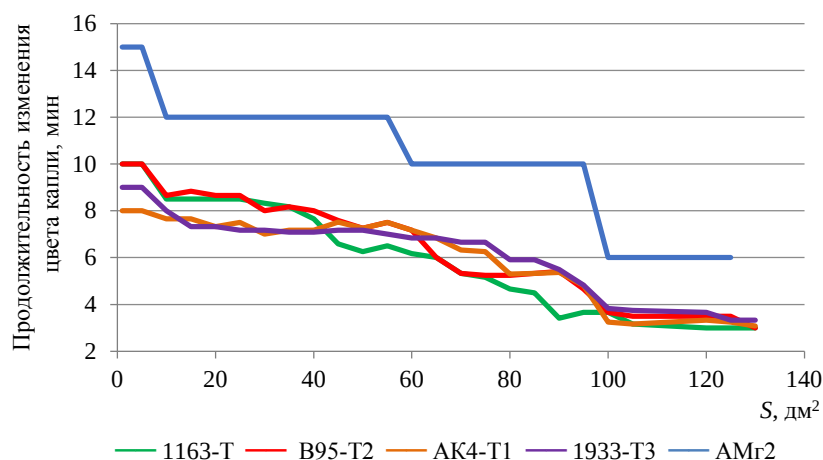


Рис. 3. Зависимости показателей каплевой пробы от суммарной площади  $S$  обработанной поверхности для алюминиевых сплавов различных систем легирования

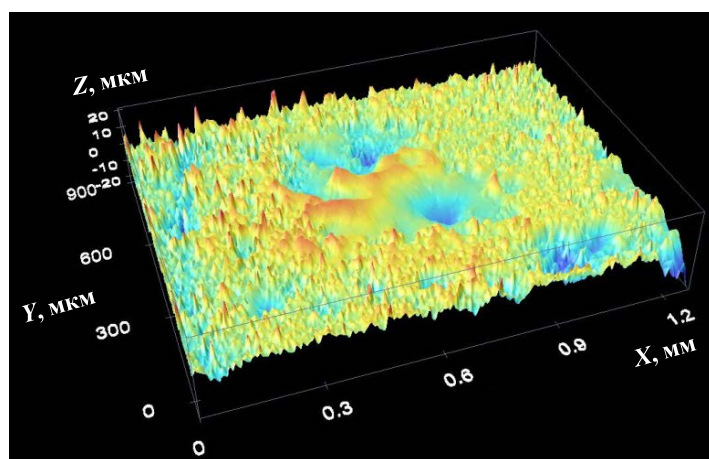


Рис. 4. 3D-изображение участка образца из сплава 1163-Т с коррозионным поражением

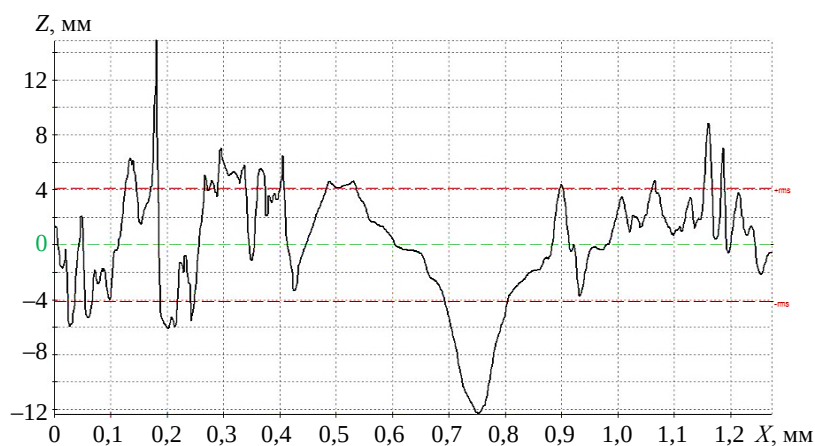


Рис. 5. Глубина коррозионных поражений, обнаруженных на образцах из сплава 1163-Т

Исходя из полученных данных, определена допустимая суммарная площадь обработки поверхности деталей из алюминиевых сплавов, при которой анодно-оксидное покрытие удовлетворяет требованиям нормативной документации – в 1 л водного раствора состава марки ВИС-А возможно наполнение поверхности площадью 120 дм<sup>2</sup> с сернокислотным анодно-оксидным покрытием без потери его защитных свойств.

Затем исследован химический состав и проведен анализ ванны водного раствора состава марки ВИС-А с применением методов титриметрического и спектрофотометрического анализов, по результатам которых разработаны методики определения компонентов раствора и способов корректировки их концентраций. Результаты данных исследований положены в основу разработки технологии применения состава марки ВИС-А и внесены в производственную инструкцию ПИ 1.2.616–2022.

Для определения защитной способности состава марки ВИС-А как ингибитора коррозии проводили коррозионные испытания в статических условиях [16, 17], для чего выбраны две коррозионные среды: дистиллированная вода и водный раствор состава марки ВИС-А.

Выбор в качестве коррозионных сред дистиллированной воды и раствора ВИС-А в дистиллированной воде обусловлен необходимостью одновременно исследовать как агрессивность состава марки ВИС-А, так и его ингибирующую способность в рекомендованной концентрации по отношению к типовым металлическим материалам. Благодаря низкой агрессивности, в данных коррозионных средах процессы протекают с невысокой интенсивностью, что позволяет проследить этапы развития коррозии на образцах металлических материалов и ингибирующий эффект, достигаемый при применении ингибитора. Согласно ГОСТ 9.502–82 (п. 1.4.14), испытание нового ингибитора, коррозионная агрессивность которого не установлена, необходимо проводить в дистиллированной воде, не содержащей и содержащей ингибитор в рекомендованной концентрации. В дальнейшем на основании полученных данных при необходимости могут быть установлены области применения ингибитора (минерализация водных растворов), максимально соответствующие конкретным эксплуатационным средам того или иного металлического материала.

Испытания проводили в камере тепла, холода и влаги с поддержанием постоянной температуры 25 °С и влажности 85 % в специальных ячейках, обеспечивающих возможность проведения длительных испытаний без уменьшения объема жидкости. В каждую ячейку подвешивали один образец в вертикальном положении, что позволяло обеспечить изоляцию образцов друг от друга и от стенок ячейки, а также обеспечивало свободный контакт образца с коррозионной средой.

Продолжительность испытаний для образцов из меди и стали составила 10 сут, для образцов из алюминиевого сплава 90 сут. Промежуточные съемы для стали и меди осуществляли через 1, 3, 5, 7, 10 сут, для алюминиевого сплава – через 1, 7, 15, 30, 60, 90 сут при количестве образцов на точку 5 шт.

По полученным данным проведен расчет защитной способности ингибитора (Z), которую вычисляли по формуле

$$Z = \frac{\Delta P - \Delta P_1}{\Delta P} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $\Delta P$ ,  $\Delta P_1$  – коррозионные потери на образце в коррозионной среде без и с добавлением состава марки ВИС-А, г.

Данные по значениям защитной способности ингибитора представлены в графическом виде на рис. 6.

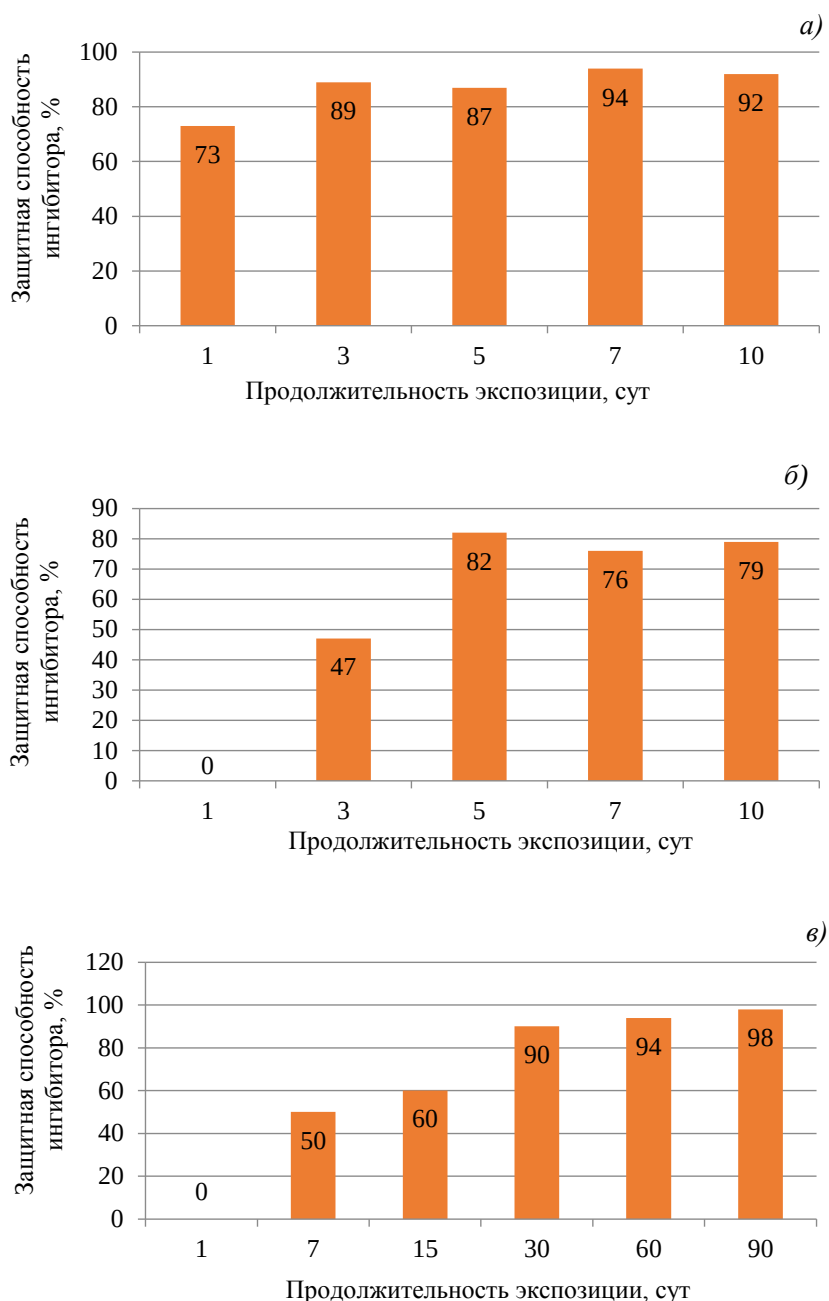


Рис. 6. Защитная способность ингибитора для образцов из стали 30ХГСА (а), меди М1 (б) и алюминиевого сплава 1163-Т (в)

Рассчитана сравнительная скорость коррозии металлических материалов в водной среде и водном растворе состава марки ВИС-А. Полученные данные также отражены на графиках, представленных на рис. 7.

Таким образом, скорость коррозии всех испытываемых металлических материалов в водной среде с ингибитором коррозии (составом марки ВИС-А) существенно меньше, чем скорость коррозии в водной среде без добавок. Так, скорость коррозии алюминиевого сплава 1163-Т в водном растворе с составом марки ВИС-А меньше в 50,4 раза по сравнению с показателями скорости коррозии в дистиллированной воде (экспозиция 90 сут); стали 30ХГСА – в 12,6 раза (экспозиция 10 сут); меди М1 – в 4,8 раза (экспозиция 10 сут).

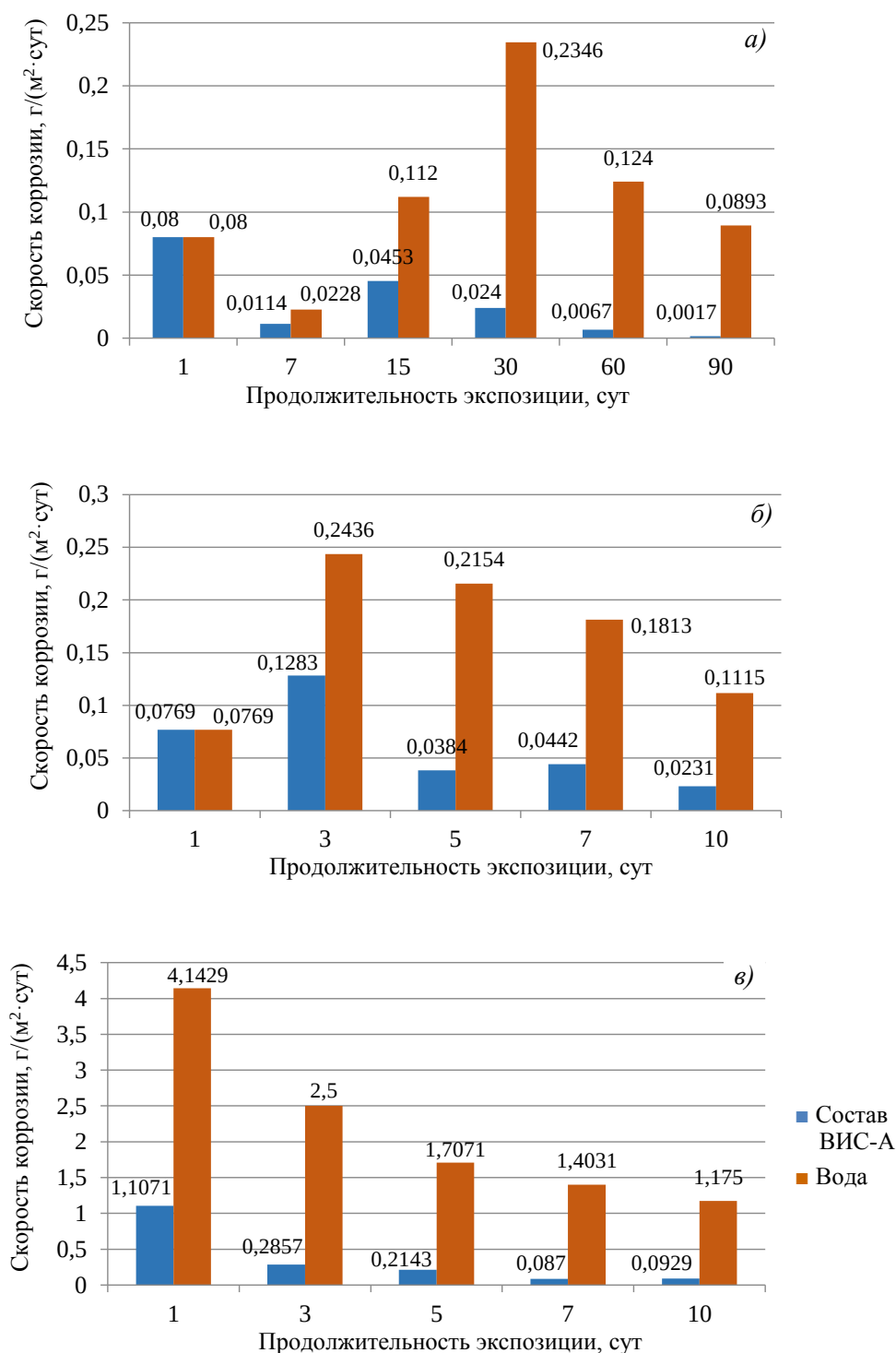


Рис. 7. Скорость коррозии для образцов из алюминиевого сплава 1163-Т (а), меди М1 (б) и стали 30ХГСА (в) в воде и в воде с составом марки ВИС-А

С учетом полученных данных можно сделать вывод о работоспособности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии в водных средах для алюминиевых сплавов, сталей и меди. Данные свойства состава марки ВИС-А продемонстрированы также при визуальной оценке состояния поверхности металлических образцов (рис. 8–10).

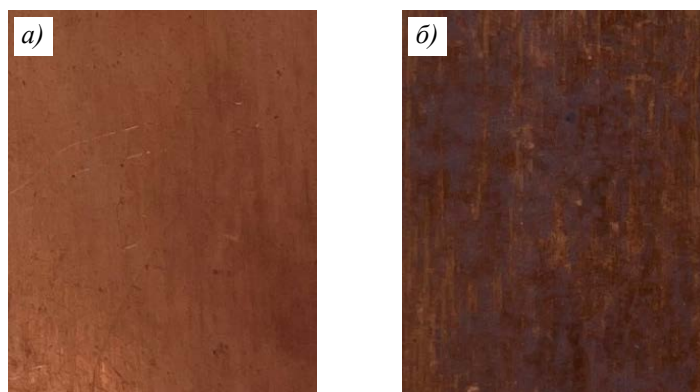


Рис. 8. Состояние поверхности образцов из меди М1 после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (10 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

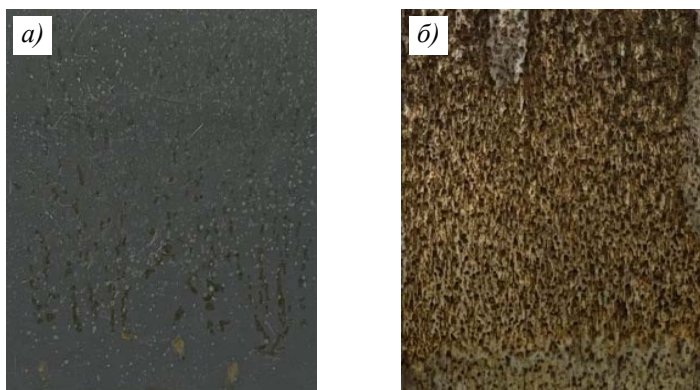


Рис. 9. Состояние поверхности образцов из стали 30ХГСА после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (10 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

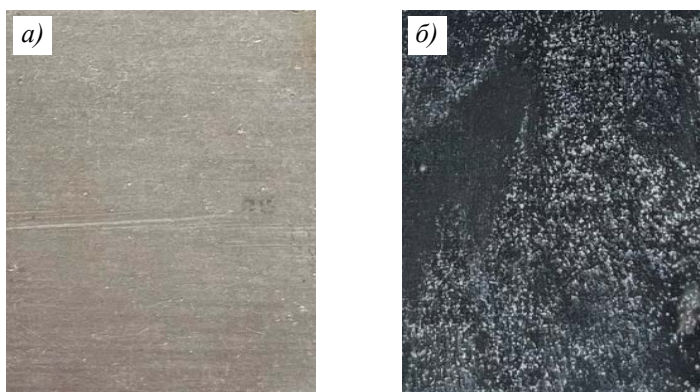


Рис. 10. Состояние поверхности образцов из алюминиевого сплава 1163-Т после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (90 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

Параллельно с вышеуказанными исследованиями осуществляли оценку защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии с помощью электрохимических исследований [18–20].

Следует отметить, что данная методика рассчитана на исследование ингибиторов для металлических материалов, скорость коррозии которых зависит только от кинетики переноса заряда и не зависит от диффузии среды в приграничном слое. Поэтому исследовать алюминиевые сплавы по данной методике некорректно, а в качестве типовых металлических материалов выбрали сталь 30ХГСА и медь М1.

Для проведения электрохимического исследования использовали потенциостат и плоскую трехэлектродную ячейку, позволяющую задавать рабочую площадь образца 1 или 10 см<sup>2</sup>. В качестве вспомогательного электрода применяли платиновую сетку, а электрода сравнения – хлорсеребряный электрод в насыщенном растворе KCl, потенциал которого в этой среде относительно нормального водородного электрода составляет +197 мВ.

Исследование электрохимического поведения металлических материалов проводили методом снятия анодной поляризационной кривой после 1 и 20 ч выдержки образцов в электролите. Поляризацию начинали с потенциала коррозии  $E_{\text{ст}} = -100$  мВ со скоростью развертки 0,1 мВ/с и останавливали при достижении тока 10<sup>-2</sup> А/см<sup>2</sup> либо потенциала +500 мВ от потенциала коррозии.

Для проведения испытаний выбрали 3%-ный раствор NaCl для исследования состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии, в частности, при воздействии хлоридсодержащих сред. Концентрацию состава марки ВИС-А изменяли с 0,01 до 0,2 %. В целях исключения различия в концентрации готовили несколько партий раствора по 10 л, сделанных в разное время, и хранили в герметичных канистрах при комнатной температуре. Для приготовления растворов использовали деионизированную воду с электропроводностью ≤1 мкСм/см и реактивы ч.д.а. (чистые для анализа).

Определение защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии проводили при сопоставлении скоростей коррозии ( $V_{\text{кор}}$ ) металлических материалов в исследуемых растворах, которые рассчитывали по формуле

$$V_{\text{кор}} = \frac{I_{\text{кор}} \cdot M_{\text{экв}} \cdot K}{\rho \cdot S}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{кор}}$  – ток коррозии, А;  $M_{\text{экв}}$  – молярная масса эквивалента, г/экв ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ :  $M_{\text{экв}} = 27,925$  г/экв;  $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+}$ :  $M_{\text{экв}} = 31,773$  г/экв);  $K$  – константа, определяющая единицы измерения скорости коррозии – для мм/год:  $K = 3272$  мм/(А·см·год);  $\rho$  – плотность испытываемого металлического материала, г/см<sup>3</sup>;  $S$  – площадь контакта образца со средой, см<sup>2</sup>.

Плотность тока коррозии ( $I_{\text{кор}}$ ) определяли экспериментально, анализируя потенциодинамические кривые металлических материалов в исследуемых растворах. Пример зависимости  $E = f(\lg I/S)$  для стали 30ХГСА и меди М1 в 3%-ном растворе NaCl представлен на рис. 11.

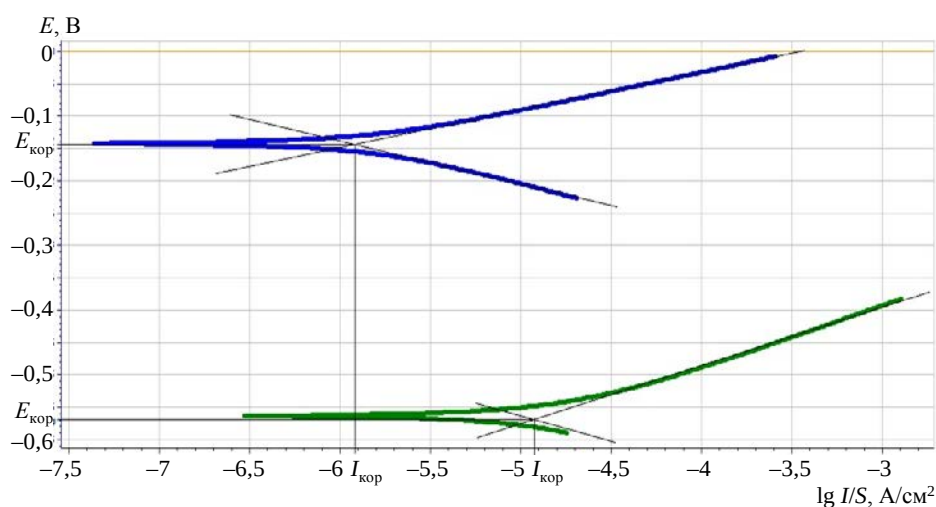


Рис. 11. Потенциодинамические кривые стали 30ХГСА (—) и меди М1 (—) в 3%-ном растворе NaCl

На полученной потенциодинамической кривой построены зависимости скорости анодного и катодного процессов от потенциала согласно зависимости Тафеля. Точка пересечения зависимостей характеризует потенциал  $E_{кор}$  и плотность тока коррозии  $I_{кор}$ , значения которых представлены в табл. 1, даны также рассчитанные по формуле (2) скорости коррозии  $V_{кор}$  для стали 30ХГСА и меди М1.

Таблица 1

Экспериментальные значения потенциала  $E_{кор}$  и плотности тока  $I_{кор}$ , а также рассчитанные скорости коррозии  $V_{кор}$  (средние значения трех измерений) для стали 30ХГСА и меди М1

| Материал     | Концентрация состава ВИС-А, %, в 3%-ном растворе NaCl | Время выдержки в растворе до испытаний, ч |                                 |                    |               |                                 |                    |
|--------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------|---------------------------------|--------------------|
|              |                                                       | 1                                         |                                 |                    | 20            |                                 |                    |
|              |                                                       | $E_{кор}$ , В                             | $I_{кор}$ , мкА/см <sup>2</sup> | $V_{кор}$ , мм/год | $E_{кор}$ , В | $I_{кор}$ , мкА/см <sup>2</sup> | $V_{кор}$ , мм/год |
| Сталь 30ХГСА | 0                                                     | –0,593                                    | 27,339                          | 318,157            | –0,703        | 6,082                           | 70,779             |
|              | 0,01                                                  | –0,561                                    | 20,847                          | 242,608            | –0,655        | 3,208                           | 37,333             |
|              | 0,05                                                  | –0,552                                    | 6,426                           | 74,783             | –0,557        | 0,427                           | 4,969              |
|              | 0,2                                                   | –0,477                                    | 5,534                           | 64,402             | –0,523        | 0,347                           | 4,045              |
| Медь М1      | 0                                                     | –0,142                                    | 1,392                           | 16,185             | –0,068        | 0,247                           | 2,872              |
|              | 0,01                                                  | –0,085                                    | 0,520                           | 6,046              | –0,052        | 0,037                           | 0,430              |
|              | 0,05                                                  | –0,135                                    | 0,147                           | 1,709              | 0,008         | 0,001                           | 0,012              |
|              | 0,2                                                   | –0,055                                    | 0,014                           | 0,163              | 0,010         | 0,0004                          | 0,005              |

Видно, что наличие состава марки ВИС-А в электролите оказывает влияние на скорость коррозии меди М1 и стали 30ХГСА, в значительной степени уменьшая их. Так, скорость коррозии стали 30ХГСА в водном 3%-ном растворе NaCl в 1,3–4,9 раза больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 1 ч) и в 1,9–17,5 раза больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 20 ч); скорость коррозии меди М1 в водном 3%-ном растворе NaCl в 2,7–99 раз больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 1 ч); в 6,7–574 раза больше в зависимости от концентрации, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 20 ч).

Для оценки защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора рассчитан коэффициент торможения коррозии ( $\gamma$ ) и степень защиты ингибитора ( $\zeta$ ) по следующим формулам:

$$\gamma = \frac{V_0}{V};$$

$$\zeta = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100 \%,$$

где  $V_0$ ,  $V$  – соответственно скорость коррозии серии образцов в электролите без и с ингибитором, мм/год.

Если параметр  $\zeta = 100 \%$  – коррозия отсутствует ( $V = 0$ ); при  $\zeta = 0 \%$  – защита отсутствует ( $V_0 = V$ ); при  $\zeta < 0 \%$  – стимулирование коррозии ( $V_0 < V$ ); при  $\zeta > 0 \%$  –

замедление коррозии ( $V_0 > V$ ). Коэффициенты торможения коррозии и степень защиты состава марки ВИС-А, рассчитанные по данным скорости коррозии, указанных в табл. 1, представлены в табл. 2.

*Таблица 2*

**Значения коэффициентов торможения и степени защиты ингибитора**

| Материал     | Концентрация состава ВИС-А, %, в 3%-ном растворе NaCl | Время выдержки в растворе до испытаний, ч |                              |                                 |                              |
|--------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
|              |                                                       | 1                                         |                              | 20                              |                              |
|              |                                                       | Коэффициент торможения коррозии           | Степень защиты ингибитора, % | Коэффициент торможения коррозии | Степень защиты ингибитора, % |
| Сталь 30ХГСА | 0,01                                                  | 1,3                                       | 23,7                         | 1,9                             | 47,2                         |
|              | 0,05                                                  | 4,2                                       | 76,5                         | 14,2                            | 92,9                         |
|              | 0,2                                                   | 4,9                                       | 79,8                         | 17,5                            | 94,3                         |
| Медь М1      | 0,01                                                  | 2,7                                       | 62,6                         | 6,7                             | 85,0                         |
|              | 0,05                                                  | 9,5                                       | 89,4                         | 239,3                           | 99,5                         |
|              | 0,2                                                   | 99,4                                      | 98,9                         | 574,4                           | 99,8                         |

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии эффективно влияет на защиту выбранных металлических материалов в водном 3%-ном растворе NaCl. Степень защиты состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии при выдержке в растворе 1 и 20 ч соответственно достигает по отношению к стали 30ХГСА значений: 79,8 и 94,3 %, к меди М1 – до 98,9 и 99,8 %.

Полученные данные подтверждают способность состава марки ВИС-А существенно тормозить протекание коррозионного разрушения медных сплавов и сталей, что позволяет положительно оценить возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии.

### **Заключения**

Разработана технология применения водного раствора состава марки ВИС-А для наполнения сернокислотных анодно-оксидных покрытий для алюминиевых сплавов, позволяющая осуществлять обработку при пониженных температурах, а также обеспечивающая защитные свойства покрытия на уровне стандартно применяемой технологии.

Состав марки ВИС-А показал хорошие результаты при защите от коррозии таких типовых металлических материалов, как алюминий, конструкционная сталь и медь, что подтверждается не только гравиметрическими, но и электрохимическими испытаниями.

Состав марки ВИС-А потенциально может успешно применяться не только при формировании анодно-оксидных покрытий, но и в строительной и смежных отраслях в качестве ингибитора коррозии.

### **Список источников**

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
2. Каблов Е.Н., Петрова А.П., Нарский А.Р. Алексей Тихонович Туманов – основатель новых научных направлений в материаловедении // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 1. С. 2–5.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
4. Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.

5. Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С., Козлова А.А. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
6. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 3–8.
7. Фомина М.А., Волков И.А., Вдовин А.И., Ямщиков Е.И. Исследование защитной способности анодно-оксидного покрытия с экологически улучшенной технологией наполнения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
8. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
9. Полякова М.А., Мустафина В.Г. Теория коррозии и методы защиты от коррозии: учеб. пособие. Магнитогорск, 2008. 139 с.
10. Агафонкина М.О., Андреева Н.П., Кузнецов Ю.И., Тимашев С.Ф. Замещенные бензотриазолы – ингибиторы коррозии меди в буферном боратном растворе коррозии // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 8. С. 1294–1301.
11. Солоп Г.Р. Разработка и применение ингибиторов коррозии на основе продуктов нефтехимии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 24 с.
12. Газизова Э.И., Бондарь М.А. Эффективность органических соединений в качестве ингибиторов коррозии // Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (Коррозия-2023): сб. материалов I Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию ФГБОУ ВО «УГНТУ». Уфа, 2023. С. 25–26.
13. Посунько И.А. Технология создания ингибиторов атмосферной коррозии // Научные исследования: теория, методика и практика: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2017. С. 149–156.
14. Кадникова О.Ю., Торетаев М.О., Акмалова О.А., Нурмухамбетова Б.Т., Кожабергенова К.Д. Разработка экологически безопасных ингибиторов коррозии для защиты текстильного оборудования // Вестник Алматинского технологического университета. 2020. № 4. С. 38–46.
15. Мухаметзянов М.И., Шакирова А.И. Исследование коррозии алюминиевых сплавов и возможные методы их защиты // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала. Уфа, 2016. С. 475–482.
16. Абрамова М.Г. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов при испытаниях на станциях континентального и морского типа // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
17. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
18. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
19. Антипов В.В., Медведев И.М., Кутырев А.Е., Волков И.А. Разработка экспресс-метода оценки защитных свойств анодно-оксидных покрытий, наполненных горячей водой, при испытаниях в растворе NaCl // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-67-78.
20. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлокстеклопластика класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

# References

1. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering of the XXI century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
2. Kablov E.N., Petrova A.P., Narsky A.R. Alexey Tikhonovich Tumanov – the founder of new scientific directions in materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 1, pp. 2–5.
3. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
4. Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM's contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
5. Duyunova V.A., Kozlov I.A., Oglodkov M.S., Kozlova A.A. Modern trends in the anodic oxidation of aluminum-lithium and aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
6. Kablov E.N. Quality control of materials – a guarantee of safety of operation of aviation equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
7. Fomina M.A., Volkov I.A., Vdovin A.I., Yamshchikov E.I. Study of protective capacity anodic oxide coating with environmental friendly improved filling technology. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
8. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I. Cadmium replacement. Stage 2 – final. Galvanic thermal coating of zinc–tin system – real alternative to cadmium plating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
9. Polyakova M.A., Mustafina V.G. *Theory of corrosion and methods of corrosion protection*: textbook. Magnitogorsk, 2008, 139 p.
10. Agafonkina M.O., Andreeva N.P., Kuznetsov Yu.I., Timashev S.F. Substituted benzotriazoles – copper corrosion inhibitors in a buffered borate corrosion solution. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2017, vol. 91, no. 8, pp. 1294–1301.
11. Solop G.R. *Development and application of corrosion inhibitors based on petrochemical products*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Ufa, 2016, 24 p.
12. Gazizova E.I., Bondar M.A. Efficiency of organic compounds as corrosion inhibitors. *Actual problems of corrosion protection of oil and gas equipment and pipelines (Corrosion–2023): collection of materials of the I Int. scientific and technical. conf., dedicated to the 75th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «USPTU»*. Ufa, 2023, pp. 25–26.
13. Posunko I.A. Technology of creating atmospheric corrosion inhibitors. *Scientific research: theory, methodology and practice: collection of materials of the II Int. scientific and practical. conf.* Cheboksary, 2017, pp. 149–156.
14. Kadnikova O.Yu., Toretaev M.O., Akmalova O.A., Nurmukhambetova B.T., Kozhabergenova K.D. Development of environmentally friendly corrosion inhibitors for the protection of textile equipment. *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2020, no. 4, pp. 38–46.
15. Mukhametzyanov M.I., Shakirova A.I. Study of corrosion of aluminum alloys and possible methods of their protection. *Modern technologies in the oil and gas industry – 2016: collection of works. International scientific and technical conf., dedicated to the 60th anniversary of the branch*. Ufa, 2016, pp. 475–482.
16. Abramova M.G. Full-scale accelerated tests of aluminum alloys at continental and marine type stations. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
17. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Comparative evaluation of methods for the determination of corrosion aggressivity of the atmosphere. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.

18. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kuttyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
19. Antipov V.V., Medvedev I.M., Kuttyrev A.E., Volkov I.A. Rapid assessment of hot water sealed anodic oxide coatings protective properties during NaCl immersion testing. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
20. Duyunova V.A., Kuttyrev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

*Информация об авторах*

**Захаров Кирилл Евгеньевич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

**Вдовин Александр Ильич**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Чумакова Екатерина Сергеевна**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Kirill E. Zakharov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Marina A. Fomina**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexander I. Vdovin**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ekaterina S. Chumakova**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Научная статья

УДК 539.4:620.197

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОКРЫТИЯМИ ПОСЛЕ 8 И 13 ЛЕТ СТАРЕНИЯ В УМЕРЕННО ТЕПЛОМ КЛИМАТЕ\* Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита

О.В. Старцев<sup>1,2</sup>, Т.В. Коваль<sup>1</sup>, Е.В. Двирная<sup>1</sup>, Г.В. Корниенко<sup>1</sup>, И.М. Велигодский<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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

**Аннотация.** Исследованы физико-химические превращения в полимерной матрице углепластика КМКУ-2м.120 методом динамического механического анализа. При климатических испытаниях в течение 8 и 13 лет пластины углепластика были защищены лакокрасочными покрытиями ВЭ-46 и АС-1115 девяти цветов. После снятия с экспозиции с поверхности пластин удалены покрытия, измерены температурные зависимости динамического модуля упругости и динамического модуля потерь образцов в двух состояниях: после сушки и после увлажнения при температуре 60 °С.

**Ключевые слова:** углепластик, лакокрасочное покрытие, климатическое старение, динамический механический анализ, температура стеклования, деструкция, пластификация

**Для цитирования:** Старцев О.В., Коваль Т.В., Двирная Е.В., Корниенко Г.В., Велигодский И.М. Исследование свойств углепластика с покрытиями после 8 и 13 лет старения в умеренно теплом климате. Часть 3. Состояние полимерной матрицы композита // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.

Scientific article

## RESEARCH OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC WITH COATINGS AFTER 8 AND 13 YEARS OF AGING IN A MODERATELY WARM CLIMATE Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite

O.V. Startsev<sup>1,2</sup>, T.V. Koval<sup>1</sup>, E.V. Dvirnaya<sup>1</sup>, G.V. Kornienko<sup>1</sup>, I.M. Veligodsky<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

<sup>2</sup>V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

**Abstract.** The third part of the article studies physicochemical transformations in the polymer matrix of carbon fiber reinforced plastic КМКУ-2m.120 by means of dynamic mechanical analysis. During 8- and 13-year climatic exposure, carbon fiber reinforced plastic plates were protected with paint and varnish coatings VE-46 and AC-1115 of nine colors. After removal from the exposure, the coatings were removed from the surface of the plates, and the temperature dependences of the dynamic storage modulus and the dynamic loss modulus were measured in two states: after drying and after moistening the samples at 60 °C.

\* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 10 (140), 2024; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 11 (141), 2024.

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastic, paint and varnish coating, climatic aging, dynamic mechanical analysis, glass transition temperature, destruction, plasticization

**For citation:** Startsev O.V., Koval T.V., Dvirnaya E.V., Kornienko G.V., Veligodsky I.M. Research of the properties of carbon fiber reinforced plastic with coatings after 8 and 13 years of aging in a moderately warm climate. Part 3. Condition of the polymer matrix of a composite. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-96-106.

### Введение

Для выяснения причин ухудшения механических показателей  $R$  (пределов прочности при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге) полимерных композиционных материалов (ПКМ) при старении в лабораторных или натуральных условиях [1] используются микроскопия [2], инфракрасная спектроскопия [3, 4], профилометрия [5], гравиметрия [6] и другие методы, среди которых широкое распространение получил метод динамического механического анализа (ДМА) [7].

Метод ДМА основан на измерении динамических модулей упругости  $E'$ , динамических модулей потерь  $E''$ , тангенса угла механических потерь  $\tan \delta$  при растяжении, изгибе и сдвиге при частоте от 0,5 до 10 Гц в широком интервале температур, включающем  $\alpha$ -переход (переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние полимерных матриц ПКМ). Измерения проводятся при малых механических нагрузках, обеспечивающих линейную вязкоупругость в границах закона Гука [8]. Достоинством метода ДМА является возможность температурных измерений на одном образце без его разрушения, что повышает точность и достоверность получаемых результатов. Методические основы определения температуры стеклования полимерных матриц  $T_g$  (одного из наиболее востребованных показателей ПКМ) и границ  $\alpha$ -перехода рассмотрены в работе [9].

Возможности метода ДМА для интерпретации результатов термовлажностного старения ПКМ представлены в работе [10], посвященной исследованию состояния эпоксидного полимера DGEBA и углепластика на его основе после выдержки в течение 4 и 8 недель в дистиллированной воде при температурах 30 и 70 °С. Вода и температура обеспечивают синергетический эффект пластификации, молекулярной деградации (гидролиза), реакции доотверждения и образования псевдопоперечных водородных связей, изменяя степень сшивки. Вода ослабляет межмолекулярное взаимодействие на границе волокна с матрицей. Кроме того, обнаружены эффекты сшивки и деструкции полимерной матрицы после выдержки углепластика при температурах 70 и 30 °С по изменению  $E'$  в высокоэластическом состоянии. Пик  $\tan \delta$  сместился к более низкой температуре из-за пластификации влагой гидрофильных участков макромолекул и разделился на два или три отдельных максимума, демонстрируя гетерогенность связующего, вызванную старением. Подобную гетерогенность пика  $\tan \delta$  наблюдали во многих исследованиях, например в работах [11–13]. Она связана с десорбцией влаги из образцов при нагреве в измерительной камере. Форма и расположение соседних  $\alpha$ -пиков на температурной зависимости  $\tan \delta(T)$  определяются количеством накопленной влаги и скоростью нагрева [9], влияющей на ее удаление.

Таким образом, зависимости  $E'(T)$  и  $\tan \delta(T)$  отражают обратимые и необратимые изменения свойств и структуры ПКМ, расширяют возможности обоснования молекулярного механизма старения [14].

Авторы работ [10, 15] предположили вероятность структурообразования в сетчатых полимерных матрицах при ДМА вследствие активирующего влияния влаги при  $\alpha$ -переходе. Поэтому особый интерес представляют примеры необратимых изменений структуры полимерных матриц [16, 17], когда вода, как значимый фактор старения [18],

перед началом измерений методом ДМА удалена из объема тестируемых образцов для предотвращения возможных дополнительных превращений, активируемых влагой, при нагреве в измерительной камере прибора.

В предыдущей части данной статьи рассмотрено состояние лакокрасочных покрытий (ЛКП), нанесенных на углепластик КМКУ-2м.120, после 8 и 13 лет экспозиции в умеренно теплом климате. Выявлена стабильность покрытия ВЭ-46 темно-зеленого, светло-серого и изумрудного цветов. Наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности оказались красная эмаль ВЭ-46 и желтая эмаль АС-1115, у которых шероховатость поверхности возросла в 1,5–2 раза. В результате длительного климатического воздействия температура стеклования  $T_g$  уменьшилась в покрытии ВЭ-46 и возросла в покрытии АС-1115. По данным работы [19], методом ДМА обнаружены признаки микрофазового расслоения расплавленного связующего ВСК-14-2м стеклопластика ВПС-53К после 12 мес. климатического воздействия.

Можно ожидать, что ЛКП препятствуют старению углепластика. Для оценки эффективности их защиты от климатического воздействия на свойства композита целесообразно использовать метод ДМА применительно к углепластику. Поэтому целью заключительной части данной статьи является исследование температуры стеклования и границ  $\alpha$ -перехода эпоксидной матрицы углепластика КМКУ-2м.120 с учетом пластифицирующего влияния влаги.

### Материалы и методы

В табл. 1 указаны основные сведения об углепластике КМКУ-2м.120 – конструкционном материале из класса клеевых препрегов [20]. Наполнителем этого материала является углеродная лента ЭЛУР-П, матрицей – эпоксидное связующее ВКС-14-2м [21, 22]. Пластины углепластика защищены фторэпоксидной (ВЭ-46) [23] и акриловой (АС-1115) [24] эмалями, нанесенными поверх слоя грунтовки ЭП-0104. Покрытия имели толщину  $95 \pm 5$  мкм, не превосходящую 3 % от толщины пластин. Пластины Г1–Г9 отличались цветом использованных пигментов: светло-серый, серо-голубой, изумрудный, голубой, темно-зеленый, красный, оранжевый, желтый и синий соответственно. Пластины Г0 экспонировали в течение 8 лет без защитного покрытия.

Таблица 1

**Характеристики пластин углепластика КМКУ-2м.120, исследованные методом динамического механического анализа**

| Шифр пластины | Продолжительность экспозиции, лет | Защитное лакокрасочное покрытие | Влагосодержание после экспозиции, % | Толщина пластины, мм | Коэффициент диффузии влаги, мм <sup>2</sup> /сут |
|---------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| Г0            | 8                                 | –                               | 0,67                                | 5,50                 | 0,130                                            |
| Г1            | 13                                | ВЭ-46                           | 1,05                                | 3,31                 | 0,034                                            |
| Г2            | 8                                 |                                 | 0,86                                | 3,18                 | 0,035                                            |
| Г3            | 8                                 |                                 | 0,76                                | 3,54                 | 0,044                                            |
| Г4            | 13                                |                                 | 0,99                                | 3,70                 | 0,042                                            |
| Г5            | 13                                |                                 | 0,68                                | 3,25                 | 0,038                                            |
| Г6            | 6                                 |                                 | 0,78                                | 3,25                 | 0,034                                            |
| Г7            | 13                                | АС-1115                         | 0,88                                | 3,38                 | 0,050                                            |
| Г8            | 8                                 |                                 | 0,74                                | 2,92                 | 0,042                                            |
| Г9            | 8                                 |                                 | 0,73                                | 3,56                 | 0,046                                            |

После экспонирования на открытом атмосферном стенде в условиях умеренно теплого климата в течение 8 и 13 лет определено влагосодержание пластин Г0–Г9 путем высушивания при температуре 60 °С с контролем массы при взвешивании на аналитических весах с точностью  $10^{-4}$  г. Показано, что влагосодержание  $w$  изменяется от

0,67 до 1,05 %, причем меньше всего влаги накоплено в пластине Г0 из-за более высокой скорости транспорта воды (коэффициент диффузии влаги в этой пластине в 3 раза превосходит значения соответствующего показателя в пластинах, защищенных ЛКП).

Измерения динамического модуля упругости  $E'$  и динамического модуля потерь  $E''$  проведены в интервале температур от 20 до 230 °С с помощью анализатора DMA 242D при частоте изгибных колебаний 1 Гц со скоростью нагрева 2 °С/мин. Использовали образцы размером 50×10 мм и толщиной 3,2±0,2 мм после удаления ЛКП. Исследовано два состояния углепластика: после сушки при температуре 60 °С и после влагонасыщения при относительной влажности 100 % и температуре 60 °С.

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

### Результаты и обсуждение

Основное внимание в этой работе обращено на  $\alpha$ -переход эпоксидной матрицы ВКС-14-2м, который исследован в соответствии с рекомендациями работы [9]. Для этого определены температурные зависимости  $E'(T)$  и  $E''(T)$ , типичный вид которых представлен на рис. 1 для образцов, вырезанных из пластины Г1 с покрытием ВЭ-46 светлосерого цвета, экспонированной в течение 13 лет.

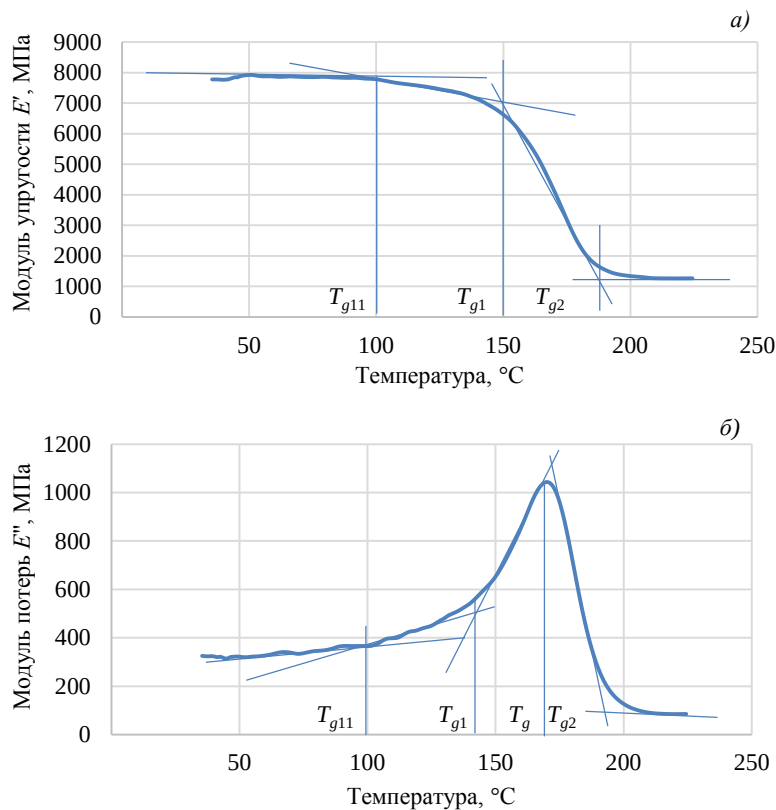


Рис. 1. Температурные зависимости динамического модуля упругости (а) и динамического модуля потерь (б) образцов углепластика, вырезанных из пластины Г1, после удаления покрытия ВЭ-46 и сушки

С учетом зависимости  $E'(T)$ , представленной на рис. 1, а, определяются нижняя ( $T_{g1}$ ) и верхняя ( $T_{g2}$ ) границы  $\alpha$ -перехода как точки пересечения базовых линий и линий, экстраполирующих линейное изменение динамического модуля упругости в начале и конце перехода эпоксидной матрицы из стеклообразного в высокоэластическое состояние [9]. Подобным образом эти же температурные переходы можно определить по

зависимости  $E''(T)$ , представленной на рис. 1, б, причем в дополнение к  $T_{g1}$  и  $T_{g2}$  также выявляется температура стеклования  $T_g$  как температура максимального значения модуля динамических потерь. В идеальном случае эти характеристические температуры, определенные двумя способами, должны совпадать [9], однако на практике всегда возникают небольшие отличия из-за погрешностей эксперимента и экстраполяции. Поэтому в табл. 2 представлены значения температур  $\alpha$ -перехода, определенные двумя указанными способами.

Таблица 2

**Характеристические температурные переходы в области стеклования  
эпоксидной матрицы ВКС-14-2м, определенные методом  
динамического механического анализа, после удаления лакокрасочного покрытия  
с поверхности углепластика КМКУ-2м.120 и сушки образцов**

| Шифр<br>пластины         | Температуры переходов, °С |          |                         |          |                                    |                         |          |
|--------------------------|---------------------------|----------|-------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|----------|
|                          | $T_{g11}$ по зависимости  |          | $T_{g1}$ по зависимости |          | $T_g$ по зависи-<br>мости $E''(T)$ | $T_{g2}$ по зависимости |          |
|                          | $E'(T)$                   | $E''(T)$ | $E'(T)$                 | $E''(T)$ |                                    | $E'(T)$                 | $E''(T)$ |
| По данным<br>работы [21] | –                         | –        | 160                     | 160      | 174                                | 185                     | –        |
| Г0                       | 95                        | 107      | 147                     | 150      | 172                                | 192                     | 195      |
| Г1                       | 100                       | 102      | 152                     | 145      | 170                                | 186                     | 193      |
| Г2                       | 138                       | –        | 165                     | 155      | 177                                | 194                     | 203      |
| Г3                       | 117                       | –        | 160                     | 157      | 177                                | 193                     | 201      |
| Г4                       | 98                        | –        | 158                     | 154      | 174                                | 191                     | 200      |
| Г5                       | 125                       | –        | 163                     | 161      | 179                                | 196                     | 204      |
| Г6                       | 103                       | 95       | 147                     | 146      | 173                                | 193                     | 201      |
| Г7                       | 93                        | 101      | 153                     | 156      | 171                                | 186                     | 194      |
| Г8                       | 95                        | 105      | 156                     | 153      | 176                                | 195                     | 201      |
| Г9                       | 95                        | –        | 160                     | 157      | 178                                | 194                     | 204      |

Измерения, проведенные методом ДМА, выявили следующую общую закономерность. Температурному переходу  $T_{g1}$  предшествует еще один аналогичный переход  $T_{g11}$ , который отсутствует на температурной зависимости эпоксидной матрицы ВКС-14-2м в материале, не подвергнутом старению [21]. Причину появления температурного перехода  $T_{g11}$  можно понять, анализируя зависимость  $E''(T)$  углепластика, экспонированного в течение 8 лет без ЛКП (рис. 2). Видно, что в результате климатического воздействия в дополнение к основному релаксационному  $\alpha$ -максимуму при температуре 172 °С сформировался дополнительный, менее выраженный,  $\alpha_1$ -максимум при температуре 140 °С, который можно считать индикатором микрофазового расслоения полимерной матрицы.

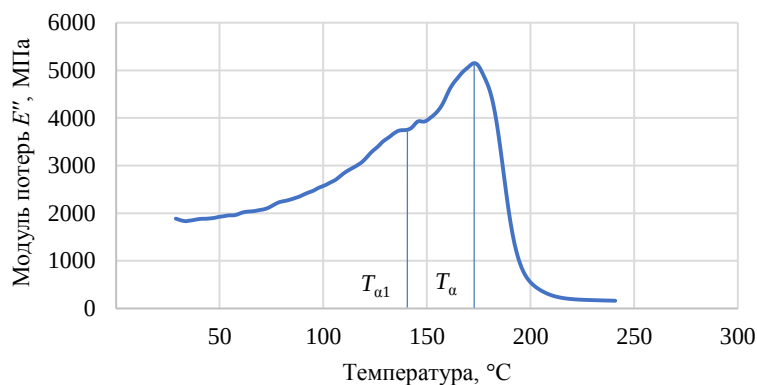


Рис. 2. Температурная зависимость динамического модуля потерь образца углепластика, вырезанного из пластины, экспонированной без покрытия, после сушки

По данным работы [25], при климатическом старении в полимерной матрице углепластика происходит частичная деструкция сшитых макромолекул, сопровождающаяся увеличением свободного объема. В результате этого ослабевает межмолекулярное взаимодействие и часть кинетических элементов сетчатого полимера выделяется в отдельную микрофазу, способную приобретать сегментальную подвижность при более низкой температуре. Дополнительный  $\alpha_1$ -максимум на зависимости  $E''(T)$  наиболее отчетливо показан для углепластика, экспонированного без защиты ЛКП, т. е. для материала с наиболее выраженным старением (рис. 2). Для случаев ослабления старения с помощью защитных ЛКП  $\alpha_1$ -максимум выражен менее отчетливо в виде плеча на низкотемпературной ветви  $\alpha$ -максимума (рис. 1, б). Однако температурный переход  $T_{g11}$ , соответствующий температуре начала  $\alpha_1$ -максимума, отчетливо проявляется на всех зависимостях  $E'(T)$  и в половине случаев зависимостей  $E''(T)$  (рис. 1, а; табл. 2).

Сравнение характеристических температур  $\alpha$ -перехода позволяет оценить роль ЛКП в ослаблении деструкции полимерной матрицы. Деструкция макромолекул эпоксидной матрицы ВКС-14-2м пластины Г0 без ЛКП характеризуется понижением температур переходов  $T_{g11}$  до 95 °С и  $T_{g1}$  до 147 °С. Защитные покрытия частично препятствуют снижению  $T_{g11}$  и  $T_{g1}$ . Эффективность защиты зависит от полимерной основы покрытия и цвета пигмента. Вероятной причиной различий характеристических температур  $\alpha$ -перехода является неодинаковый температурный режим пластин Г0–Г9, рассмотренный в работе [26], который зависит от цвета поверхности ПКМ.

За 8–13 лет старения акриловое покрытие АС-1115 не улучшило температуру  $T_{g11}$  в пластинах Г7–Г9 по сравнению с пластиной Г0, тогда как фторэпоксидное покрытие ВЭ-46 в пластинах Г2, Г3, Г5 повысило эту температуру до 117–138 °С. Из-за разрушения покрытия с пигментом красного цвета в пластине Г6 выявлена самая низкая температура перехода  $T_{g1} = 147$  °С. Во всех пластинах температуры  $T_g$  и  $T_{g2}$  практически не изменились по сравнению с исходными значениями. Это является доказательством высокой климатической стойкости углепластика КМКУ-2м.120.

Метод ДМА позволил получить новую информацию о влиянии защитных ЛКП на эффект пластификации влагой эпоксидной матрицы углепластика. Основные результаты этого исследования представлены в табл. 3

Таблица 3

**Влияние влаги на эпоксидную матрицу углепластика КМКУ-2м.120**

| Шифр пластины | $E'_{30} / E'_{230}$ | $G_{xy}$ , ГПа |             |                  | $\Delta G_{xy} / \Delta w$ , ГПа/% |                  | $T_g$ при увлажнении, °С | $\Delta T_g$ , °С |
|---------------|----------------------|----------------|-------------|------------------|------------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
|               |                      | без сушки      | после сушки | после увлажнения | после сушки                        | после увлажнения |                          |                   |
| Г1            | 6,1                  | 4,35           | 4,94        | 4,04             | 0,56                               | 0,19             | 118                      | 52                |
| Г2            | 6,3                  | 5,60           | 6,17        | 4,93             | 0,66                               | 0,30             | 123                      | 54                |
| Г3            | 6,1                  | 4,27           | 4,45        | 3,85             | 0,24                               | 0,20             | 134                      | 43                |
| Г4            | 6,9                  | 3,58           | 3,71        | 3,17             | 0,13                               | 0,22             | 134                      | 40                |
| Г5            | 6,6                  | 4,41           | 4,78        | 4,09             | 0,55                               | 0,23             | 129                      | 50                |
| Г6            | 8,3                  | 5,30           | 5,85        | 5,03             | 0,71                               | 0,32             | 106                      | 67                |
| Г7            | 8,0                  | 4,92           | 5,30        | 4,48             | 0,43                               | 0,20             | 120                      | 51                |
| Г8            | 6,0                  | 4,98           | 5,47        | 4,52             | 0,67                               | 0,21             | 120                      | 56                |
| Г9            | 6,3                  | 4,12           | 4,32        | 3,74             | 0,28                               | 0,15             | 129                      | 49                |

Примечание.  $E'_{30} / E'_{230}$  – соотношение динамических модулей упругости при температурах 30 и 230 °С;  $G_{xy}$  – модуль сдвига в плоскости листа;  $\Delta G_{xy} / \Delta w$  – соотношение изменений модуля упругости и влагосодержания.

По результатам измерений, выполненных методом ДМА, определен вклад эпоксидной матрицы в величину  $E'$  пластин с различными ЛКП. С учетом зависимостей  $E'(T)$  сопоставлены соотношения динамических модулей упругости при температурах 30 и 230 °С ( $E'_{30}/E'_{230}$ ). Такой прием позволяет оценить вклад эпоксидной матрицы в величину  $E'$  композита. Поскольку модуль упругости углеродного волокна стабилен [1, 20] и обеспечивает основной вклад в величину  $E'$  при температуре  $T = 30$  °С, то его зависимость от эпоксидной матрицы будет заметна в ее высокоэластическом состоянии, т. е. при  $T > T_{g2}$ , например при 230 °С. Показано, что в пластинах Г6 и Г7 с покрытиями красного и оранжевого цветов величина соотношения  $E'_{30}/E'_{230}$  оказалась на 20 % больше, чем в пластинах Г8 и Г9, и приблизилась к значению 8,4 для пластины Г0, экспонированной без ЛКП. Следовательно, увеличение соотношения  $E'_{30}/E'_{230}$  обусловлено уменьшением  $E'_{230}$  из-за деструкции полимерной матрицы, которая оказалась больше в пластинах Г0, Г6, Г7.

Дополнительные ДМА-измерения увлажненных пластин углепластика позволили получить сведения о пластификации влагой эпоксидной матрицы ВКС-14-2м составленных образцов по температуре  $T_g = T_\alpha$  на графиках зависимостей  $E''(T)$ . Из данных табл. 3 следует, что для большинства пластин температура этого максимума сместилась на  $46 \pm 6$  °С. Только для пластины Г6 смещение увеличилось до 67 °С. По-видимому, повышенная деструкция матрицы в пластине Г6 привела к увеличению активности и количества гидрофильных групп, влияющих на температуру  $\alpha$ -максимума пластифицированного полимера.

Для подтверждения роли ЛКП в ослаблении пластифицирующего влияния влаги на эпоксидную матрицу проведены измерения модуля сдвига в плоскости листа  $G_{xy}$  углепластика КМКУ-2м.120 по методике, рассмотренной в работе [27]. Показатель  $G_{xy}$  наиболее чувствителен к изменениям свойств полимерной компоненты композита. Для измерений использованы образцы без кондиционирования, а также после увлажнения и сушки. Мерой пластифицирующего действия выбран тангенс угла наклона  $\psi = \Delta G_{xy}/\Delta w$  на линейной зависимости модуля сдвига  $G_{xy}(w)$  [27]. Наибольшими значениями характеризуется эпоксидная матрица образца углепластика, вырезанного из пластины Г6, в режиме как сушки, так и увлажнения (табл. 3).

### Заключения

Показатели температур  $\alpha$ -перехода (перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние) эпоксидной матрицы, определенные методом ДМА, позволяют оценить способность ЛКП препятствовать деструкции полимерных цепей в эпоксидной матрице углепластика.

Из-за разрушения покрытия с пигментом красного цвета в пластине Г6 выявлена самая низкая температура  $\alpha$ -перехода  $T_{g1} = 147$  °С. Во всех других пластинах температуры практически не изменились по сравнению с исходными значениями, что подтверждает высокую климатическую стойкость углепластика КМКУ-2м.120.

Выявлено значительное различие показателей свойств ПКМ, содержащих накопленную влагу, и после ее удаления. Поэтому при исследовании влияния эксплуатационных факторов на свойства новых ПКМ необходимо сравнивать их показатели с учетом обратимых и необратимых изменений [28].

Метод ДМА перспективен для исследований микрофазового расслоения полимерных матриц ПКМ, вызванного деструкцией и пластификацией полимерных цепей, зависящей от условий старения и эффективности защиты ЛКП.

*Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.*

## Список источников

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
2. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Николаев Е.В., Курносов А.О. Исследование влияния воздействия атмосферных факторов на свойства полимерного конструкционного стеклопластика на цианэфирной основе в естественных условиях холодного, умеренного и тропического климата // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
4. Khajeh A., Mustapha F., Sultan M.T.H. et al. The effect of thermooxidative aging on the durability of glass fiber-reinforced epoxy // Advances in Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 2015. Art. 372354. DOI: 10.1155/2015/372354.
5. Старцев В.О., Лебедев М.П., Фролов А.С. Измерение показателей рельефа поверхности при изучении старения и коррозии материалов. 1. Российские и зарубежные стандарты // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 6. С. 32–38.
6. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2023. Vol. 62. P. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
7. Menard K. Dynamic mechanical analysis: a practical introduction. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. 240 p.
8. Meyer F., Oldörp K., de Jong F. Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) on polymer nanocomposites // Thermo Fisher Scientific. 2021. Vol. 241. Art. 0621.
9. Startsev O.V., Vapirov Yu.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis // Mechanics of Composite Materials. 2020. Vol. 56. P. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Alessi S., Pitarresi G., Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites // Composites. Part B. 2014. Vol. 67. P. 145–153. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.006.
11. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of epoxy adhesives and carbon fibre reinforced polymer laminates used in strengthening systems: accelerated ageing versus natural ageing // Materials. 2021. Vol. 14. Art. 1533. DOI: 10.3390/ma14061533.
12. Francis B. Water absorption studies in epoxy nanocomposites // Epoxy Composites. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, 2021. P. 241–258. DOI: 10.1002/9783527824083.ch9.
13. Gibhardt D., Buggisch C., Meyer D., Fiedler B. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties // Front Matter. 2022. Vol. 9. Art. 826076. DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
14. Chateauminois A., Chabert B., Soulier J.P., Vincent L. Dynamic mechanical analysis of epoxy composites plasticized by water: artifact and reality // Polymer Composites. 1995. Vol. 16. No. 4. P. 288–296.
15. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions // Polymers. 2020. Vol. 12. Art. 614.
16. Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale // Composites. Part A. 2015. Vol. 68. No. 1. P. 235–241.
17. Bussu G., Lazzeri A. On the use of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) for measuring glass transition temperature of polymer matrix fibre reinforced composites // Journal Material Science. 2006. Vol. 41. P. 6072–6076.
18. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012. Vol. 2012. Is. 4. P. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.

19. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика марки ВПС-53К // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4–2. С. 220–228.
20. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
22. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Мельников Д.А., Беседнов К.Л., Павлюк Б.Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.
23. Семенова Л.В., Нефедов Н.И., Белова М.В., Лаптев А.Б. Системы лакокрасочных покрытий для вертолетной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
24. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М., Кривов В.А., Владимирский В.Н., Офицерова М.Г. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // Лакокрасочные материалы и их применение. 1986. № 4. С. 16–18.
25. Старцев В.О., Вардамян А.М. Влияние внешних воздействий на коэффициент линейного теплового расширения углепластика. Часть 3. Климатическое старение наномодифицированного цианэфирного углепластика // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-99-117.
26. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
27. Старцев О.В., Корниенко Г.В., Гладких А.В., Горбовец М.А. Неразрушающие измерения модуля сдвига в плоскости листа при старении полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2024. № 3. С. 21–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-3-21-30.
28. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.

#### References

1. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
2. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Andreeva N.P., Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Kurnosov A.O. Research of climatic factors influence of cold, temperate (moderate) and tropical climates on properties of construction fibreglass. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 07, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-105-114.
4. Khajeh A., Mustapha F., Sultan M.T.H. et al. The effect of thermooxidative aging on the durability of glass fiber-reinforced epoxy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 2015, art. 372354. DOI: 10.1155/2015/372354.

5. Startsev V.O., Lebedev M.P., Frolov A.S. Measurement of surface relief indicators in the study of aging and corrosion of materials. 1. Russian and foreign standards. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 6, pp. 32–38.
6. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, pp. 1789–1822. DOI: 10.1080/25740881.2023.2234461.
7. Menard K. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, 240 p.
8. Meyer F., Oldörp K., de Jong F. Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) on polymer nanocomposites. *Thermo Fisher Scientific*, 2021, vol. 241, art. 0621.
9. Startsev O.V., Vapirov Yu.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, pp. 227–240. DOI: 10.1007/s11029-020-09875-5.
10. Alessi S., Pitarresi G., Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites. *Composites. Part B*, 2014, vol. 67, pp. 145–153. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.006.
11. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of epoxy adhesives and carbon fibre reinforced polymer laminates used in strengthening systems: accelerated ageing versus natural ageing. *Materials*, 2021, vol. 14, art. 1533. DOI: 10.3390/ma14061533.
12. Francis B. Water absorption studies in epoxy nanocomposites. *Epoxy Composites*. Weinheim: WILEY-VCH GmbH, 2021, pp. 241–258. DOI: 10.1002/9783527824083.ch9.
13. Gibhardt D., Buggisch C., Meyer D., Fiedler B. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties. *Front Matter*, 2022, vol. 9, art. 826076. DOI: 10.3389/fmats.2022.826076.
14. Chateauminois A., Chabert B., Soulier J.P., Vincent L. Dynamic mechanical analysis of epoxy composites plasticized by water: artifact and reality. *Polymer Composites*, 1995, vol. 16, no. 4, pp. 288–296.
15. Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions. *Polymers*, 2020, vol. 12, art. 614.
16. Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale. *Composites. Part A*, 2015, vol. 68, no. 1, pp. 235–241.
17. Bussu G., Lazzeri A. On the use of dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) for measuring glass transition temperature of polymer matrix fibre reinforced composites. *Journal Material Science*, 2006, vol. 41, pp. 6072–6076.
18. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: III. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, vol. 2012, is. 4, pp. 323–329. DOI: 10.1134/S0036029512040040.
19. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the influence of climatic impact on the properties of fiberglass grade VPS-53K. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4–2, pp. 220–228.
20. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
21. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F. Properties and application of polymer composite materials based on glue prepreps. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.
22. Petrova A.P., Lukina N.F., Melnikov D.A., Besednov K.L., Pavlyuk B.F. Research of properties of cured adhesive binders. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 04, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.

23. Semenova L.V., Nefedov N.I., Belova M.V., Laptev A.B. Systems of paint coatings for helicopter equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 56–61. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-56-61.
24. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirova Yu.M., Krivov V.A., Vladimirov V.N., Ofitserova M.G. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, p. 16–18.
25. Startsev V.O., Vardanyan A.M. Influence of external influences on the coefficient linear thermal expansion of carbon fiber plastics. Part 3. Climatic aging of nanomodified cyanester carbon plastic. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-99-117.
26. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
27. Startsev O.V., Kornienko G.V., Gladkikh A.V., Gorbovets M.A. Non-destructive measurements of the shear modulus in the sheet plane during aging of polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2024, no. 3, pp. 21–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-3-21-30.
28. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. The influence of operational factors on the properties of carbon fiber based on polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.

#### Информация об авторах

**Старцев Олег Владимирович**, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru); и. о. директора ИФТПС СО РАН, [administration@iptpn.ysn.ru](mailto:administration@iptpn.ysn.ru)

**Коваль Татьяна Васильевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Двирная Елена Вячеславовна**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Корниенко Герман Викторович**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Велигодский Илья Михайлович**, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Oleg V. Startsev**, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM; Acting Director, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, [administration@iptpn.ysn.ru](mailto:administration@iptpn.ysn.ru)

**Tatiana V. Koval**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Elena V. Dvirnaya**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**German V. Kornienko**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ilya M. Veligodsky**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 12.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2024.  
The article was submitted 12.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2024.

Научная статья

УДК 579.017.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-107-128

## ВЫДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНЫХ ШТАММОВ ДЕСТРУКТОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОБРАЗЦОВ ОБОРОТНОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО И НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ЗАВОДОВ

*В.Ю. Ермишев<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.** Представлены методы выделения бактериальных штаммов потенциальных деструкторов полимерных материалов из образцов оборотной воды предприятий по производству нефтепродуктов. Культуры экспонировали с полимерными материалами и полимерными субстратами. Данные о видовом составе бактериальных культур получены в результате секвенирования ДНК-фрагмента, кодирующего V4-участок 16S рРНК бактерий. Проведена сравнительная оценка кинетики роста чистых культур бактерий рода *Pseudomonas* в минеральной среде с добавлением реактивного и дизельного топлива.

**Ключевые слова:** биодеструкция, бактериальные штаммы, синтетические полимерные и композиционные материалы, топливо, секвенирование, 16S рРНК, *Pseudomonas*

**Для цитирования:** Ермишев В.Ю. Выделение бактериальных штаммов деструкторов полимерных материалов из образцов оборотной охлаждающей воды нефтеперерабатывающего и нефтехимического заводов // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-107-128.

Scientific article

## ISOLATION OF BACTERIAL STRAINS OF POLYMER MATERIALS DESTRUCTORS FROM SAMPLES OF RECYCLED COOLING WATER FROM OIL REFINERIES AND PETROCHEMICAL PLANTS

*V.Yu. Ermishev<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.** The article presents methods for isolating bacterial strains of potential destructors of polymer materials, using the example of recycled water samples from enterprises producing petroleum products. The cultures were exposed with polymer materials and polymer substrates. Data on the species composition of bacterial cultures were obtained as a result of DNA sequencing of a fragment encoding the V4 site of the 16S rRNA of bacteria. The obtained pure cultures of bacteria of the genus *Pseudomonas* were used to obtain comparative growth kinetics in a mineral medium with the addition of jet and diesel fuel.

**Keywords:** biodegradation, bacterial strains, synthetic polymer and composite materials, fuel, sequencing, 16S rRNA, *Pseudomonas*

**For citation:** Ermishev V.Yu. Isolation of bacterial strains of polymer materials destructors from samples of recycled cooling water from oil refineries and petrochemical plants. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-107-128.

### **Введение**

Первичные продукты нефтепереработки применяются для синтеза исходных компонентов в производстве полимерных материалов. Полиэфирные и поливиниловые волокна, адгезивные покрытия, связующие и клеи в составе полимерных композиционных материалов могут иметь множество вариантов исполнения в зависимости от назначения конечного продукта. Такие полимерные материалы, как полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и поливинилхлорид, полиакрилаты и эпоксидные смолы, широко распространены благодаря уникальным физико-химическим свойствам, механическим характеристикам и стойкости к воздействию окружающей среды.

Учитывая совокупный объем произведенных и импортированных производных олефиновой и ароматической фракций нефти, насчитывающих десятки наименований, можно предположить, что как минимум несколько сотен тысяч тонн полимерных материалов не будут подвергнуты рециклингу или полной переработке и останутся в окружающей среде. Это обстоятельство является серьезной экологической проблемой, поскольку ни один из упомянутых полимерных материалов не подвержен быстрому биологическому разложению [1, 2].

Скорость процесса биодеструкции полимеров в окружающей среде в первую очередь определяется химическим составом и степенью кристалличности материала, а также интенсивностью воздействия климатических факторов, важнейшими из которых являются температура и влажность [3–8]. Происходит изменение физико-механических (потеря формы, массы, снижение вязкости, гибкости, охрупчивание) и химических (разрыв химических связей, снижение молекулярной массы мономеров) свойств материала. На этапе дезинтеграции материал получает необратимые повреждения, которые при участии микроорганизмов сначала приводят к фрагментации материала и в дальнейшем к его минерализации, подразумевающей полную деполимеризацию с образованием диоксида углерода, метана и воды в зависимости от конечного акцептора электронов [9–12].

Одним из наиболее часто упоминаемых бактериальных штаммов биодеструкторов является *Ideonella sakaiensis* 201-F6, для которого установлен биохимический механизм утилизации ПЭТФ, включая структуру и активность ключевых ферментов деполимеризации и дальнейшей метаболической ассимиляции частей мономера – терефталевой кислоты и этиленгликоля [13, 14]. С химической точки зрения ПЭТФ является инертным полимером за счет наличия ароматических компонентов с эфирными связями в составе мономера. Однако ПЭТФ, использованный в эксперименте с культурой *Ideonella sakaiensis* 201-F6, имел достаточно низкую кристалличность (1,9 %), в то время как ПЭТФ, применяемый для изготовления тары и упаковок, имеет кристалличность от 30 до 40 %, что существенно снижает его биодоступность [1, 13, 14].

В данной работе демонстрируется практическая возможность получения из сложных эндемических сообществ микроорганизмов чистых культур бактериальных штаммов рода *Pseudomonas* как наиболее активных в отношении органических соединений, в том числе токсичных, и растворимых в воде полимеров, применяемых в производстве материалов.

### **Материалы и методы**

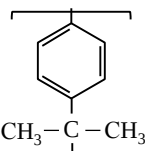
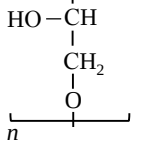
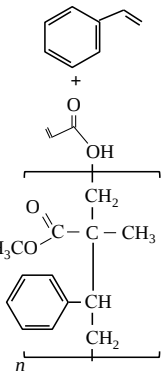
Химический состав оборотной охлаждающей воды нефтеперерабатывающего (НПЗ) и нефтехимического (НХЗ) заводов определен в испытательном лабораторном

центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в республике Башкортостан» в соответствии с сертифицированными методами исследования (см. приложение, табл. 1 и 2).

Для экспонирования с бактериальной культурой использовали образцы материалов размером 25×70×1,5 мм (табл. 1). Перед взаимодействием с микроорганизмами поверхность контрольных и опытных образцов, размещенных на пластиковой подложке, обрабатывали раствором 0,3%-ной соляной кислоты и выдерживали в течение 12 ч при комнатной температуре. Затем дважды образцы выдерживали в течение 6 ч в камере светопогоды в диапазоне длин волн ультрафиолетового излучения 300–400 нм при плотности потока 65 Вт/м<sup>2</sup> и относительной влажности ~25 %.

Таблица 1

## Материалы, использованные для экспонирования с бактериальной культурой

| Обозначение материала | Материал                                                    | Химическая структура мономера                                                       | Производитель                      | Характеристики                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A2                    | Клеевая пленка ВК-36                                        |    | НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ | Полуотвержденный эпоксидный олигомер металлического цвета, температура полного отверждения не менее 120 °С, может содержать наполнитель, включает пластификатор                                                                                                             |
| B2                    | Клеевая пленка ВК-102А                                      |                                                                                     |                                    | Полуотвержденный эпоксидный олигомер желтого цвета, температура полного отверждения не менее 175 °С, содержит наполнитель стекловолокно и пластификатор                                                                                                                     |
| E1                    | Клей эпоксидный (компонент А)                               |  | Акапол                             | Пастообразная неотвержденная масса металлического цвета, содержит эпоксидные олигомеры, наполнители и пластификаторы, химически отверждаемая, термостойкая до 120 °С                                                                                                        |
| F2                    | Отвердитель меркаптанов (компонент Б)                       |                                                                                     |                                    | Пастообразная масса белого цвета, содержит тиоловый отвердитель, наполнители и пластификаторы, термостойкая до 120 °С                                                                                                                                                       |
| C3                    | Сырьевой компонент – стирол-акриловая дисперсия Акрэмос-140 |  | Акрэмос                            | Водная дисперсия, содержащая 50 % (по массе) сополимера стирола и (мет)акрилатов, не содержащая пластификатора, стабилизированная анионной эмульгирующей системой, средний размер частиц 0,12–0,15 мкм. Частичное отверждение проводили при температуре 75 °С в течение 2 ч |

Образцы материалов фотографировали с помощью зеркальной фотокамеры Canon EOS 5D Mark III с объективом EF 100mm f/2.8L Macro.

Для получения первичных бактериальных культур из каждого образца воды НПЗ и НХЗ в соответствии с общим микробным числом (ОМЧ) отбирали определенный объем и переносили в 50 мл базовой минеральной среды с добавлением 1 % (объемн.) стерильного дизельного топлива марки ДТ-Л-40-К2 (ГОСТ 305-2013). Состав среды, мМ: 7 –  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; 5 –  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; 20 –  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ; 10 –  $\text{NaCl}$ ; 0,8 –  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ; 0,18 –  $\text{CaCl}_2$ ; pH = 7.

Базовую среду стерилизовали автоклавированием при температуре 121 °С в течение 15 мин.

Для замедления или предотвращения возможного роста микромицетов добавляли 50 мкл раствора амфотерицина В в 50%-ном этиловом спирте с исходной концентрацией действующего вещества 100 мг/мл.

Культуры наращивали в течение не менее 72 ч при температуре 25 °С и скорости перемешивания 140 мин<sup>-1</sup>.

Полученные первичные бактериальные культуры высевали на твердую базовую минеральную среду, содержащую 1 % агарозы и 0,01 % дрожжевого экстракта, для проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР) отдельных колоний и идентификации секвенированием.

Для экспонирования материалов подготовленные опытные образцы помещали в 20 мл базовой минеральной среды, содержащей смесь первичных бактериальных культур плотностью ~0,05 ОЕ/мл, полученную смешиванием в равных пропорциях первичных культур для каждого образца воды НПЗ и НХЗ. Контрольные образцы материалов помещали в 20 мл базовой минеральной среды без добавления бактериальных культур. Контрольные и опытные образцы материалов экспонировали в течение 60 дней при температуре 25 °С и скорости перемешивания 50 мин<sup>-1</sup>. В табл. 2 приведены сведения о соответствии наименований образцов материалов и полученных проб для секвенирования.

Таблица 2

**Соответствие наименований образцов материалов и полученных проб  
для секвенирования на каждом этапе отбора**

| Этап отбора                                                                                                                                                                             | Пробы для секвенирования после экспонирования с материалом |                      |             |             |                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------|-------------|-------------|----------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                         | дизельное топливо ДТ-Л-40-К2                               | клеевая пленка ВК-36 | компонент А | компонент Б | стирол-акриловая суспензия Акрэмос-140 |
| 1                                                                                                                                                                                       | D-MC                                                       | –                    | –           | –           | –                                      |
| 2                                                                                                                                                                                       | –                                                          | AG-Mix               |             |             |                                        |
| 3                                                                                                                                                                                       | –                                                          | A2 PVA               | E1 PVA      | F2 PVA      | C3 PVA                                 |
| 4                                                                                                                                                                                       | –                                                          | –                    | E1 SA       | F2 SA       | –                                      |
| Примечание. D-MC – проба первичной культуры; AG-Mix – проба после экспонирования первичной культуры с образцами материалов; PVA – поливиниловый спирт; SA – стирол-акриловая суспензия. |                                                            |                      |             |             |                                        |

Для получения чистых культур штаммов бактерий проводили рассев аликвот культуральной жидкости, полученной после экспонирования первичных культур с материалами, на твердые базовые минеральные среды, содержащие 1 % агарозы и 0,025 % стерильных субстратов акриловой дисперсии или поливинилового спирта. Полученные отдельные колонии снова засевали в жидкие базовые минеральные среды с теми же субстратами. Полученные отдельные колонии идентифицировали секвенированием.

При подсчете колоний выявлено низкое ОМЧ при экспонировании с клеевой пленкой ВК-102А (В2), поэтому в целях экономии расходных материалов и времени данная проба исключена из дальнейшего отбора.

Для получения данных о показателях роста выделенных чистых культур бактерий на топливах использовали 3 мл базовой минеральной среды с добавлением 3 мл дизельного топлива марки ДТ-Л-40-К2 (ГОСТ 305–2013) или реактивного топлива марки ТС-1 (ГОСТ 10227–86). Данные о кинетике роста получали в течение 96 ч при температуре 25 °С и начальной плотности исследуемых культур 0,025 ОЕ/мл без перемешивания, пробирки в течение всего времени испытаний находились в вертикальном положении. В качестве отрицательного контроля использовали чистую среду с указанными видами топлив.

Оптическую плотность бактериальных культур в контрольных и опытных образцах определяли с помощью спектрофотомера ПЭ-5000 (Экрос, Россия) при длине волны 600 нм. Кинетику роста определяли по формуле

$$K = \lg(A_{24} - A_0),$$

где  $A_0$  и  $A_{24}$  – поглощение среды исходное и через 24 ч при длине волны 600 нм.

Для амплификации V4-фрагментов 16S рРНК бактерий использовали модифицированные олигонуклеотидные праймеры 515f и 806r [15]. Концентрацию препаратов ДНК определяли флуориметрическим методом с помощью набора QuDye BR (Люмекс, Россия) согласно инструкции. Геномную ДНК, полученную с помощью набора для выделения ДНК на силикагелевых колонках, в количестве ~50 нг добавляли в 100 мкл смеси для ПЦР, содержащей HS Taq ДНК-полимеразу, реакционный буфер, дезоксинуклеозидтрифосфаты и соответствующие синтетические олигонуклеотиды (Евроген, Россия). Реакции выполняли в автоматическом цифровом программируемом термоциклере (амплификаторе) с нагреваемой крышкой при следующих параметрах: 95 °С в течение 5 мин; 95 °С в течение 30 с, 60 °С в течение 30 с, 72 °С в течение 10 с (30 циклов); 72 °С в течение 5 мин. Полученные ПЦР-фрагменты очищали с помощью реагента фракционирования ДНК на магнитных частицах в соответствии с инструкцией производителя.

Результаты ПЦР визуализировали с помощью электрофореза в 1,5%-ном агарозном геле для молекулярной биологии в однократном трис-ацетат-ЭДТА буфере с красителем бромид этидия в количестве 0,5 мкг/мл (Хеликон, Россия). Для электрофореза использовали четырехканальный источник питания с выходным напряжением 5000 В с постоянным током 8 В/см агарозного геля. Для определения размера ДНК-фрагментов, получаемых в результате ПЦР, использовали маркеры молекулярной массы с размерами 100, 200, 300, 500, 700, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000, 7000 и 10000 пар нуклеотидов.

Для амплификации ДНК полноразмерного фрагмента 16S рРНК бактерий использовали модифицированные олигонуклеотиды 27f и 1492r [16]. Параметры реакции: 95 °С в течение 5 мин; 95 °С в течение 30 с, 58 °С в течение 30 с, 72 °С в течение 1 мин (30 циклов); 72 °С в течение 5 мин. Для выделения ДНК из агарозного геля использовали набор LumiPure (Lumiprobe, Россия). Результаты ПЦР визуализировали с помощью электрофореза с указанными ранее параметрами и оборудованием. Данные о первичной структуре выделенных ДНК-фрагментов получены в компании Евроген (Москва) на генетическом анализаторе 3500xL. Сборка и валидация перекрывающихся прочтений выполнены в специализированной программе [17].

Данные коротких прочтений V4-фрагмента гена 16S рРНК бактерий получены с помощью высокопроизводительного секвенатора с набором реагентов для секвенирования nano kit, v2 (500 cycles), работы выполнены согласно официальному руководству компании изготовителя. Качество прочтений анализировали с помощью

соответствующей программы (см. приложение, рис. 1) [18]. Удаление адаптеров, сборка перекрывающихся прочтений, выравнивание по базе данных первичных структур гена 16S рРНК архей и бактерий, визуализации выполнены с применением модулей программы reporter v.2.6.2.3.

Для ПЦР-исследования отдельных колоний первичных культур использовали специфичные для рода *Pseudomonas* праймеры PSF2 и PAGS-R [19]. Реакции выполняли при следующих параметрах: 95 °С в течение 3 мин; 95 °С в течение 30 с, 60 °С в течение 30 с, 72 °С в течение 30 с (30 циклов); 72 °С в течение 5 мин. Для выявления наличия плазмид *incP9* использовали олигонуклеотиды her9F и her9R [20]. Для поиска генов диоксигеназ ароматических соединений применяли праймеры TOD-F и TOD-R [21]. Реакции выполняли при следующих параметрах: 95 °С в течение 3 мин; 95 °С в течение 30 с, 55 °С в течение 30 с, 72 °С в течение 30 с (35 циклов); 72 °С в течение 5 мин. Реагенты и оборудование для ПЦР указаны ранее. Результаты ПЦР визуализировали с помощью электрофореза с указанными ранее параметрами и оборудованием.

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

### Результаты и обсуждение

Таксономическая идентификация первичных бактериальных культур, полученных на первом этапе отбора, демонстрирует, что образец на 95 % состоит из бактерий рода *Pseudomonas* (рис. 1). Такой результат связан в первую очередь с составом базовой минеральной среды и, по-видимому, с высоким содержанием бактерий указанного рода в исходных образцах оборотной охлаждающей воды НПЗ и НХЗ.

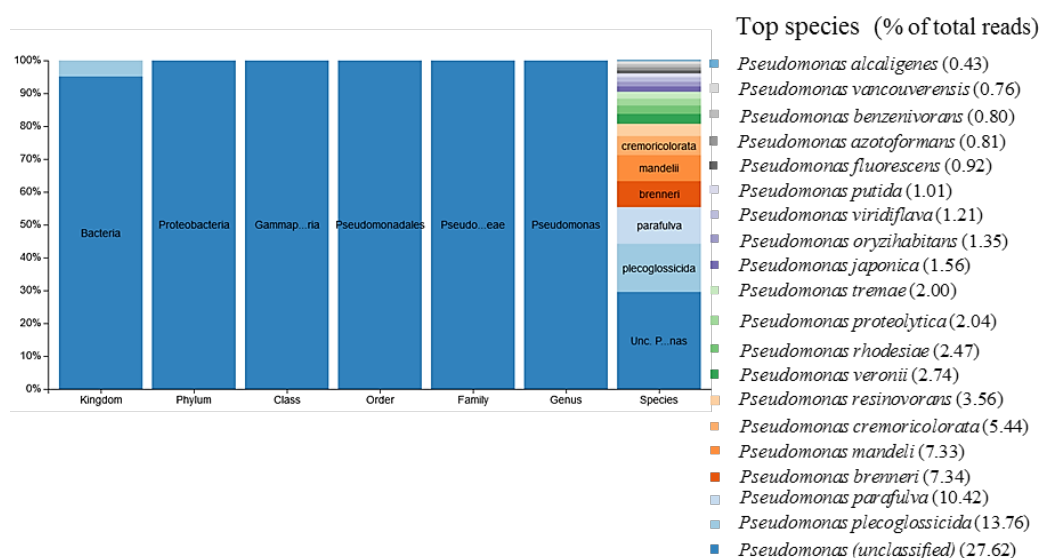


Рис. 1. Наиболее представленные виды бактерий рода *Pseudomonas* в пробе D-МС с указанием абсолютного количества прочтений V4-фрагмента 16S рРНК каждого из идентифицированных видов бактерий в процессе секвенирования (% of total reads). Чем больше абсолютное количество прочтений V4-фрагмента 16S рРНК, тем выше физическое количество клеток бактерий соответствующего таксона в пробе

На этом этапе решено провести ПЦР-исследование отдельных колоний первичных культур для выяснения эффективности такого подхода к поиску целевых фенотипов бактериальных штаммов. Для этого выбраны две последовательности мишени,

одна из которых представляет собой участок плазмидного репликона *incP9*, а вторая – участок гена *todC1*, кодирующего диоксигеназу бензола, толуола и хлорбензола. При этом ген *todC1*, по-видимому, имеет хромосомную локализацию в бактериальной клетке.

С учетом того, что указанные плазмиды и ген *todC1* найдены исключительно в бактериях рода *Pseudomonas*, необходимо установить, что каждая из отобранных колоний относится к этому роду (см. приложение, рис. 2).

Как можно убедиться, каждая из 18 отобранных колоний является представителем рода *Pseudomonas*. Эти данные хорошо согласуются с анализом 16S рРНК первичных культур в пробе D-МС, которые служили источником для ПЦР-исследования.

Дальнейший ПЦР-анализ 18 образцов с олигонуклеотидами *ger9F/ger9R* и *TOD-F/TOD-R* выявил предположительное наличие этих последовательностей ДНК только в одном образце (см. приложение, рис. 3).

Хотя для полной уверенности в том, что амплифицированные фрагменты ДНК действительно являются участками *repA* и *todC1*, необходимо секвенирование полученных в результате ПЦР фрагментов ДНК. Данный образец культуры выбран для дальнейшего анализа в качестве результата применения такого подхода к поиску редких фенотипов бактерий.

Полученный штамм в одном из запусков секвенирования в качестве отдельного образца идентифицирован по V4-фрагменту 16S рРНК как *Pseudomonas plecoglossicida* (см. приложение, рис. 4).

Перед экспонированием с первичной культурой образцы материалов целенаправленно повреждали с помощью соляной кислоты и УФ-излучения (см. приложение, рис. 5). Одним из результатов такого рода воздействий является также полная стерильность каждого образца материала вследствие длительного воздействия перечисленных факторов.

Для экспонирования с первичной культурой бактерий не использовали контрольные образцы материалов, не прошедшие подготовку описанным способом. Это связано с тем, что с учетом указанной цели исследования испытаниям подвергали культуру микроорганизмов, а материалы служили в качестве инструмента, поэтому отрицательными контролями выступили прошедшие соответствующую подготовку материалы без добавления к стерильной среде микроорганизмов.

После 60 дней экспонирования из каждого образца материалов с первичной культурой бактерий отобрана часть среды для получения смешанной культуры в пробе AG-Mix. Анализ пробы AG-Mix демонстрирует существенное увеличение видов бактерий по сравнению с первичной культурой в пробе D-МС, что является следствием появления в ранге класса и ниже дополнительных таксонов (рис. 2 и 3).

Причиной перераспределения таксономического состава популяции бактерий из первичных культур после экспонирования с образцами материалов является изменение химического состава исходной минеральной среды в результате перехода органических и минеральных компонентов материалов в растворимое или коллоидное состояние в течение длительного времени. Кроме того, не исключены различного рода взаимодействия бактерий с поверхностными и подповерхностными участками материалов, включая биопленки или другие структуры. Эти обстоятельства приводят к наращиванию ранее некультивируемых и/или плохо растущих в исходной среде бактерий. В то же время происходит подавление роста или элиминация тех штаммов, которые не способны выжить в данных условиях внешней среды при тотальном сокращении общего микробного числа в пробах.

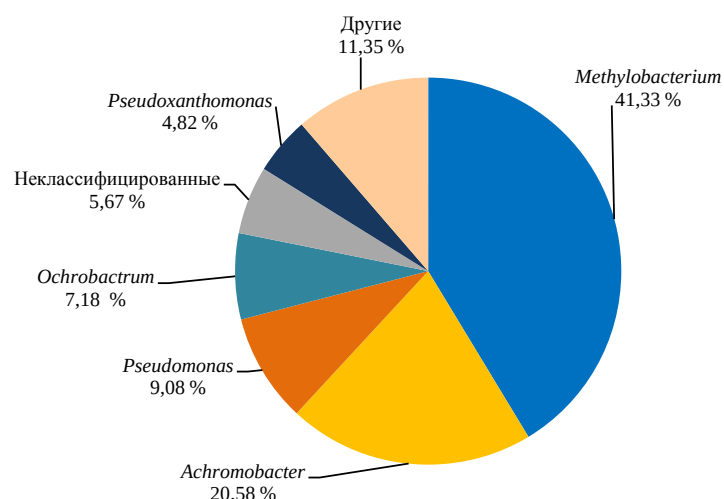


Рис. 2. Наиболее представленные таксоны бактерий в пробе AG-Mix

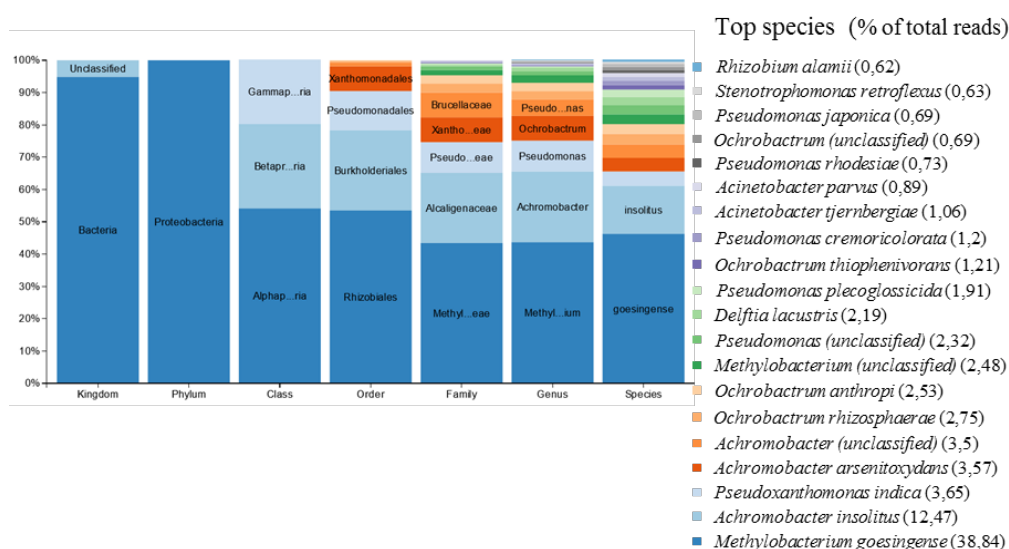


Рис. 3. Видовой состав пробы AG-Mix с указанием абсолютного количества прочтений V4-фрагмента 16S рРНК в процессе секвенирования (% of total reads)

На заключительных этапах отбора отдельные культуры, полученные в результате экспонирования с соответствующими материалами, переносили в базовую минеральную среду с добавлением в качестве единственного источника углерода поливинилового спирта или стирол-акриловой дисперсии. Применение указанных субстратов способствовало дальнейшей дифференциации культур и их обогащению наиболее активными фенотипами (рис. 4; см. приложение, рис. 6). С учетом того факта, что химически и структурно эти субстраты абсолютно разные, они позволяют выявить материал, вносящий наибольший вклад в таксономическое разнообразие культуры, в пробе AG-Mix.

В результате переноса культур после экспонирования с материалами в среду с поливиниловым спиртом происходит обогащение сообщества бактерий изначально мало представленными и плохо культивируемыми штаммами *Pseudomonas*, в то время как в присутствии стирол-акрилатов увеличивается представленность штаммов *Ochrobactrum*, *Delftia*, *Pseudoxanthomonas*, *Achromobacter* и снижается изначально высокая концентрация штаммов *Pseudomonas*. Появление в питательной среде стирол-

акрилатов в составе с анионными эмульгаторами модифицирует среду, смещая фокус отбора на другие таксоны бактерий. Это, в частности, объясняет обогащение пробы AG-Mix видами бактерий, представленность которых увеличилась после экспонирования первичных культур из пробы D-МС с материалом Акрэмос-140.

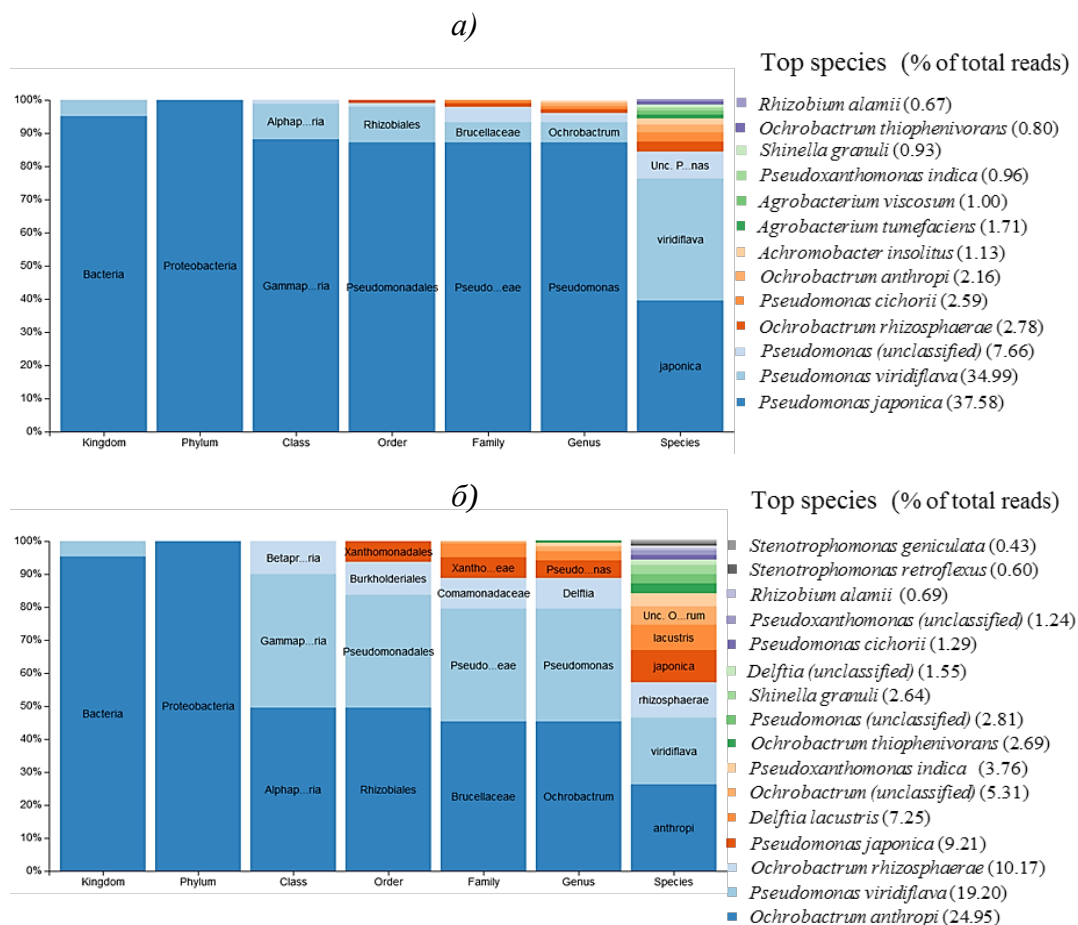


Рис. 4. Видовые составы проб E1 PVA (а) и E1 SA (б) с указанием абсолютного количества прочтений V4-фрагмента 16S рРНК в процессе секвенирования (% of total reads)

Штамм *Methylobacterium goesingense*, высоко представленный в пробе AG-Mix (рис. 2 и 3), при наращивании на соответствующих субстратах практически полностью элиминируется (рис. 4; см. приложение, рис. 6). Это, по-видимому, связано с отсутствием метаболических компетенций в отношении использованных субстратов и возросшей конкуренцией со стороны других штаммов, подавляющих его рост.

На рис. 5 представлена сводная диаграмма наиболее представленных бактериальных штаммов в культурах, полученных в результате отбора.

Для получения чистых культур наиболее активных штаммов *Ps. viridiflava* и/или *Ps. japonica* выбрана бактериальная культура из пробы СЗ PVA, полученная в результате наращивания в поливинилового спирте бактерий, выделенных после экспозиции первичных культур с отвержденной стирол-акриловой дисперсией Акрэмос-140.

Штамм *Ps. japonica* отдельно идентифицирован путем секвенирования полноразмерной последовательности гена 16S рРНК, полученной из чистой культуры. Данные о нуклеотидной последовательности доступны в GeneBank NCBI (Accession number: PQ432336).

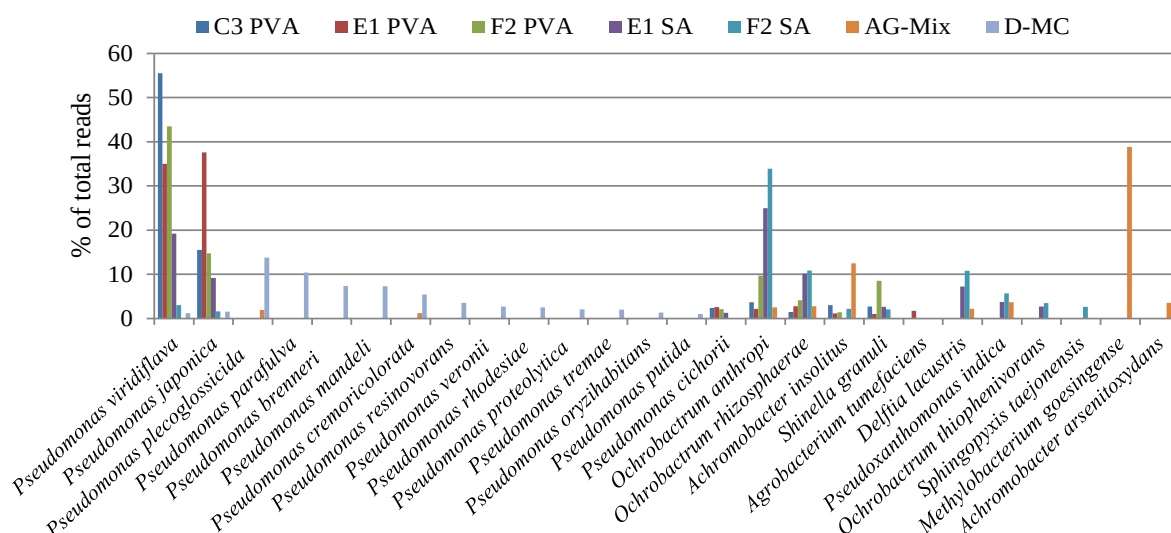


Рис. 5. Представленность идентифицированных видов бактерий в пробах. Идентифицированные в каждой пробе виды бактерий с абсолютным количеством прочтений V4-фрагмента 16S рРНК в процессе секвенирования (% of total reads) <1 % не учитывали

Для получения данных о показателях роста на двух видах топлив использовали чистые культуры штаммов *Ps. plecoglossicida* и *Ps. japonica* (см. приложение, рис. 7), выделенные до и после экспонирования с материалами соответственно (рис. 6).

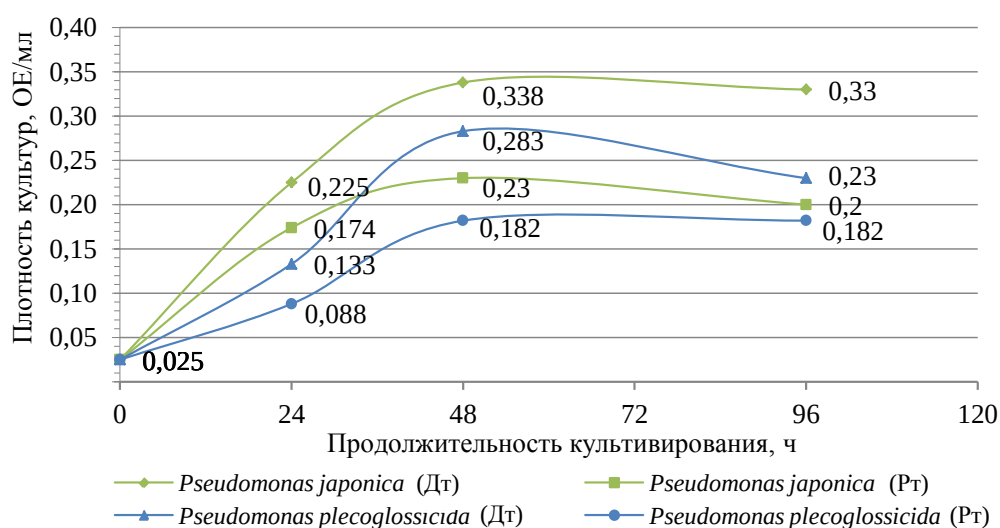


Рис. 6. Кривые роста чистых культур штаммов *Ps. japonica* и *Ps. plecoglossicida* на дизельном (Дт) и реактивном топливе (Рт)

Показано более чем двукратное превышение скорости роста штамма *Ps. japonica* на реактивном топливе и двукратное – на дизельном топливе по сравнению со штаммом *Ps. plecoglossicida* (рис. 7).

Полученные данные хорошо согласуются с результатами секвенирования пробы D-MC (рис. 1), в которой штамм *Ps. plecoglossicida* изначально является одним из доминирующих. На следующих этапах отбора во всех пробах (рис. 1–4; см. приложение, рис. 6) можно наблюдать снижение концентрации этого штамма одновременно с увеличением концентрации других штаммов *Pseudomonas*, главным образом *Ps. viridiflava*

и *Ps. japonica*. Это наблюдение свидетельствует о том, что полученные виды бактерий не являются результатом накопления мутаций (мутагенеза) в процессе длительного экспонирования с материалами, поскольку перечисленные штаммы изначально находились в смеси в равных условиях и имели некоторые шансы накопить при экспозиции полезные мутации. При этом у штамма *Ps. plecoglossicida*, по-видимому, таких шансов было кратно больше, с учетом его концентрации в пробе D-МС (13,76 %), по сравнению с *Ps. japonica* и *Ps. viridiflava* (1,56 и 1,21 % соответственно).

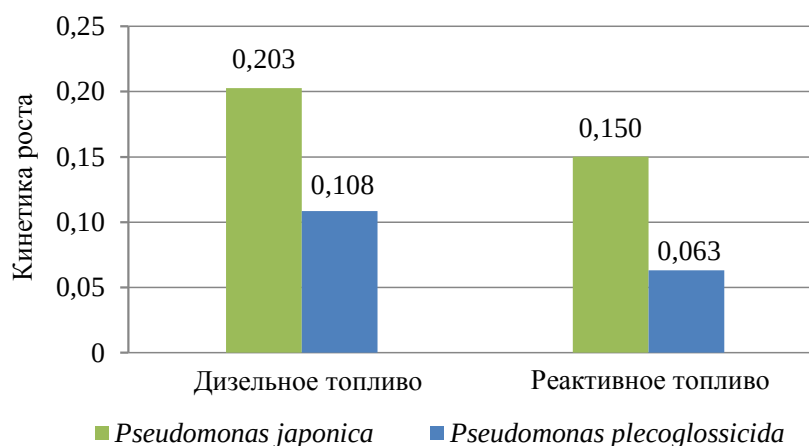


Рис. 7. Кинетика роста чистых культур штаммов *Ps. japonica* и *Ps. plecoglossicida* на дизельном и реактивном топливе, полученных в интервале от начала роста до 24 ч

Полученные данные и результаты их анализа позволяют также констатировать, что ПЦР-исследование как способ поиска желаемых бактериальных фенотипов в таксономически неоднородных сообществах микроорганизмов весьма трудоемко, обладает низкой эффективностью и более пригодно для детального анализа отдельных видов бактерий.

### Заключения

Представленный метод может быть полезен для получения из сложных эндемических сообществ микроорганизмов редких фенотипов бактерий, в том числе биодеструкторов, некультивируемых или плохо культивируемых в богатых питательных средах. Гибкость в выборе субстратов и материалов обеспечивает достаточный уровень масштабируемости – предложенный метод может применяться не только в отношении штаммов *Pseudomonas*, но и для поиска желаемых фенотипов бактерий в других таксонах. Некоторые из полученных таким способом микроорганизмов могут оказаться естественными продуцентами ценных биологически активных веществ, в том числе биоцидных препаратов, найти применение в методиках испытаний топлив на стойкость к воздействию микроорганизмов, применяться для утилизации материалов или устранения последствий загрязнения нефтепродуктами окружающей среды.

### Список источников

1. Narancic T., Kevin E. Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem // Microbiology. 2019. Vol. 165. P. 129–137. DOI: 10.1099/mic.0.000749.
2. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review // Journal of Polymers and the Environment. 2010. No. 18. P. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.

3. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials. II. Development of methods for studying the early stages of aging // Russian metallurgy (Metally). 2020. Vol. 2020. No. 10. P. 1088–1094. DOI: 10.1134/S0036029520100110.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
5. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
7. Startsev O.V., Krotov A., Mashinskaya G. Climatic Ageing of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect // Journal Polymeric Material. 1997. Vol. 37. P. 161–171.
8. Frisch H.L. Diffusion in polymers // Journal of Applied Polymer Science. 1970. No. 14. P. 1657.
9. Lucas N., Bieniaime C., Belloy C. et al. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques // Chemosphere. 2008. No. 4. P. 429. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.064.6.
10. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism // Environmental Science and Engineering. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 1–31.
11. Ермишев В.Ю., Лаптев А.Б., Старцев В.О. Особенности оценки стойкости полимерных материалов к биодеструкции в лабораторных условиях. Часть 1. Разрушение полимерных материалов в природных средах, выбор штаммов бактерий, питательные среды и условия культивирования // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-138-148.
12. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
13. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethyleneterephthalate) // Science. 2016. Vol. 353. P. 759–769.
14. Ермишев В.Ю. Метаболические возможности бактерий в отношении синтетических углеводов, используемых в производстве неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 2 (120). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.
15. Baker G.C., Smith J.J., Cowan D.A. Review and re-analysis of domain-specific 16S primers // Journal of Microbiological Methods. 2003. Vol. 55. P. 541–555. DOI: 10.1016/j.mimet.2003.08.009.
16. Polz M.F., Cavanaugh C.M. Bias in template-to-product ratios in multitemplate PCR // Applied and Environmental Microbiology. 1998. Vol. 11. P. 3724–3730. DOI: 10.1128/AEM.64.10.3724-3730.1998.
17. Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M. A unified bioinformatics toolkit // Bioinformatics. 2012. Vol. 28. P. 1166–1167. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts091.
18. Vashishtha K., Gaud C., Andrews S., Krueger C. A quality control tool to analyse sequencing library compositions // F1000Research. 2022. Vol. 11. P. 1122. DOI: 10.12688/f1000research.125325.2
19. Nair A.V., Pradeep M.A., Vijayan K.K. Molecular approach for the rapid detection of Bacillus and Pseudomonas genera dominant antagonistic groups from diverse ecological niches using colony multiplex PCR // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2014. Vol. 41. P. 1367–5435. DOI: 10.1007/s10295-014-1441-4.
20. Rainey P. A pair of PCR primers for Incp-9 plasmids // Microbiology. 1999. Vol. 145. P. 11. DOI: 10.1099/00221287-145-11-3003.

21. Baldwin B., Nakatsu C., Nies L. Detection and Enumeration of Aromatic Oxygenase Genes by Multiplex and Real-Time PCR // *Applied and Environmental Microbiology*. 2003. Vol. 69. P. 3350–3358. DOI: 10.1128/AEM.69.6.3350-3358.2003.

### References

1. Narancic T., Kevin E. Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem. *Microbiology*, 2019, vol. 165, pp. 129–137. DOI: 10.1099/mic.0.000749.
2. Sinha V., Patel M.R., Patel J.V. Pet Waste Management by Chemical Recycling: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2010, no. 18, pp. 8–25. DOI: 10.1007/s10924-008-0106-7.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials. II. Development of methods for studying the early stages of aging. *Russian metallurgy (Metally)*, 2020, vol. 2020, no. 10, pp. 1088–1094. DOI: 10.1134/S0036029520100110.
4. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
5. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
7. Startsev O.V., Krotov A., Mashinskaya G. Climatic Ageing of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect. *Journal Polymeric Material*, 1997, vol. 37, pp. 161–171.
8. Frisch H.L. Diffusion in polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 1970, no. 14, p. 1657.
9. Lucas N., Bienaime C., Belloy C. et al. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques. *Chemosphere*, 2008, no. 4, p. 429. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.064.6.
10. Eskander S., Saleh H. Biodegradation: Process Mechanism. *Environmental Science and Engineering*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1–31.
11. Ermishev V.Yu., Laptev A.B., Startsev V.O. Peculiarities of assessing the resistance of polymeric materials to biodegradation in laboratory conditions. Part 1. Degradation of polymeric materials in natural environments, selection of bacterial strains, nutrient media and cultivation conditions. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-138-148.
12. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
13. Yoshida S., Hiraga K., Takehana T. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethyleneterephthalate). *Science*, 2016, vol. 353, pp. 759–769.
14. Ermishev V.Yu. Metabolic possibilities of bacteria with respect to synthetic hydro-carbons used in the production of non-metallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-132-146.
15. Baker G.C., Smith J.J., Cowan D.A. Review and re-analysis of domain-specific 16S primers. *Journal of Microbiological Methods*, 2003, vol. 55, pp. 541–555. DOI: 10.1016/j.mimet.2003.08.009.
16. Polz M.F., Cavanaugh C.M. Bias in template-to-product ratios in multitemplate PCR. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, vol. 11, pp. 3724–3730. DOI: 10.1128/AEM.64.10.3724-3730.1998.

17. Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M. A unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*, 2012, vol. 28, pp. 1166–1167. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts091.
18. Vashishtha K., Gaud C., Andrews S., Krueger C. A quality control tool to analyse sequencing library compositions. *F1000Research*, 2022, vol. 11, pp. 1122. DOI: 10.12688/f1000research.125325.2
19. Nair A.V., Pradeep M.A., Vijayan K.K. Molecular approach for the rapid detection of *Bacillus* and *Pseudomonas* genera dominant antagonistic groups from diverse ecological niches using colony multiplex PCR. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2014, vol. 41, pp. 1367–5435. DOI: 10.1007/s10295-014-1441-4.
20. Rainey P. A pair of PCR primers for Incp-9 plasmids. *Microbiology*, 1999, vol. 145, p. 11. DOI: 10.1099/00221287-145-11-3003.
21. Baldwin B., Nakatsu C., Nies L. Detection and Enumeration of Aromatic Oxygenase Genes by Multiplex and Real-Time PCR. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, vol. 69, pp. 3350–3358. DOI: 10.1128/AEM.69.6.3350-3358.2003.

***Информация об авторах***

**Ермишев Владимир Юрьевич**, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

***Information about the authors***

**Vladimir Yu. Ermishev**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.11.2024.  
The article was submitted 23.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.11.2024.

**Приложение к статье «Выделение бактериальных штаммов деструкторов полимерных материалов из образцов оборотной охлаждающей воды нефтеперерабатывающего и нефтехимического заводов» (автор: В.Ю. Ермишев)**

Таблица 1

**Химический состав оборотной охлаждающей воды нефтехимического завода**

| Показатель                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Значение показателя для воды водоблока |       |       |                  |                   |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-------|-------|------------------|-------------------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1                                      | 2     | 3     | 4<br>(I система) | 4<br>(II система) | АБХМ  |
| Содержание, мг/л:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                        |       |       |                  |                   |       |
| нефтепродуктов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,21                                   | 0,15  | 0,09  | 5,49             | 5,40              | 0,36  |
| железа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0,161                                  | 0,195 | 0,372 | 0,590            | 0,610             | 0,351 |
| взвешенных веществ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 10                                     | 11    | 8     | 16               | 19                | 8     |
| хлорид-иона                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 91                                     | 112   | 289   | 187              | 187               | 233   |
| сульфат-иона                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 131                                    | 128   | 277   | 199              | 388               | 430   |
| фосфат-ионов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,24                                   | 0,05  | 0,09  | 0,05             | 0,05              | 0,42  |
| Содержание кальция, ммоль/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5,5                                    | 6,6   | 12,4  | 7,9              | 9,1               | 12,2  |
| pH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 8,5                                    | 8,0   | 8,2   | 8,5              | 8,6               | 8,6   |
| Электропроводность, мкСм/см                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1020                                   | 1290  | 2580  | 1880             | 1870              | 2250  |
| Жесткость общая, мг-экв/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 7,2                                    | 9,6   | 19,8  | 12,3             | 12,6              | 16,4  |
| Щелочность общая, мг-экв/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3,9                                    | 4,2   | 4,2   | 3,5              | 3,4               | 5,4   |
| Общее микробное число, КОЕ/мл                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10 <sup>3</sup>                        |       |       |                  |                   |       |
| Примечание. В водоблоке 1 (I система) обслуживается установка «Висбрекинг»; в водоблоке 2 (II система) – УПВ-20; в водоблоке 3 (II система) – АКС; в водоблоке 4 (I система) – Л-24-5, Л-24-7, Л-35-5, Л-24-300, «Изориформинг», ЭЛОУ-АВТ-6, «Элементарная сера», Г-43-107М/1, ГОБKK, парк метанола; в водоблоке 4 (II система) – Л-24-5, Л-24-7, Л-35-5, ЦВК-3, Г-43-107М/1, ГОБKK, конденсатная станция; в водоблоке АБХМ (II система) – абсорбционная холодильная машина. |                                        |       |       |                  |                   |       |

Таблица 2

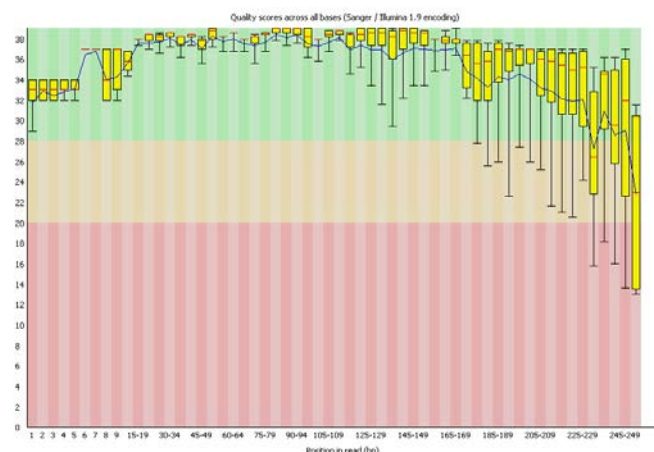
**Химический состав оборотной охлаждающей воды нефтеперерабатывающего завода**

| Показатель                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Значение показателя для воды водоблока |        |        |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------|--------|-------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 2                                      | 3      | 4      | 5     |
| Содержание, мг/л:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                        |        |        |       |
| нефтепродуктов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,76                                   | 0,50   | 0,38   | 0,60  |
| железа                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1,79                                   | 0,66   | 0,81   | 0,73  |
| взвешенных веществ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 17                                     | 11     | 15     | 7,9   |
| хлорид-иона                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 383                                    | 240    | 419    | 254   |
| сульфат-иона                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 473                                    | 298    | 471    | 338   |
| фосфат-ионов                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,48                                   | 1,37   | 2,33   | 1,25  |
| Содержание кальция, ммоль/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 234,46                                 | 144,29 | 232,46 | 156,3 |
| pH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 8,45                                   | 8,55   | 8,68   | 8,51  |
| Электропроводность, мкСм/см                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2440                                   | 1676   | 2005   | 1605  |
| Жесткость общая, мг-экв/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 15,3                                   | 10,8   | 16,4   | 10,8  |
| Щелочность общая, мг-экв/л                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 6,6                                    | 4,1    | 6,5    | 4,0   |
| Общее микробное число, КОЕ/мл                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 10 <sup>3</sup>                        |        |        |       |
| Примечание. Обслуживаемые установки – потребители охлажденной воды. Водоблок 2 обслуживает: цех 2-3-5/III для производства концентрированного этилена, пропан-пропиленовой фракции, концентрированного пропилена, бутилен-бутадиеновой фракции, жидких продуктов пиролиза; цех 603-609 для производства изопропилбензола; цех 101-615 для производства фенола и ацетона; цех 106-605 для производства инертных газов и сжатого воздуха, холодильного и жидкого аммиака; товарное производство, обеспечивающее прием, хранение, приготовление и откачку сырья, готовой продукции, реагентов и вспомогательных материалов. Водоблок 3 обслуживает: цех 1/I для пиролиза нефтяных углеводородов, компримирования пирогаза, сепарации пирогаза и бутилен-бутадиеновой фракции; цех 1/II для производства олефинов (этилена и пропилена) методом термического расщепления углеводородов нефти; цех 2 для фракционирования пирогаза методом абсорбционной дистилляции, производства концентрированного этилена методом дистилляции и обеспечения соответствующих установок промышленным холодом (пропан-пропиленовая фракция, аммиак). Водоблок 4 обслуживает: цех 202-205 для производства полиэтилена низкой плотности высокого давления в трубчатых реакторах; цех 500-504 для производства полиэтилена низкой плотности высокого давления в автоклавных реакторах; производство полипропилена. Водоблок 5 обслуживает: цех М-1-2 для получения α-метилстирола; цех 400 для производства синтетического этиленпропилендиенового каучука; отделение 8001 для концентрирования пропилена; отделение 405-406 для компримирования газа. |                                        |        |        |       |

a)

Basic Statistics

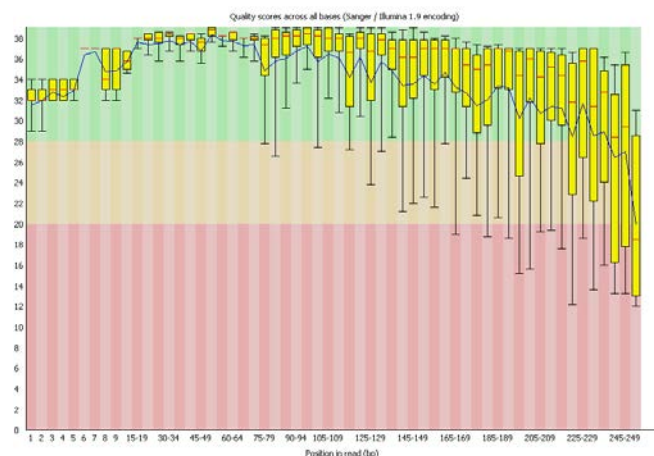
| Measure                           | Value                                |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Filename                          | NP2minMEDmix_S1_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls              |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9                |
| Total Sequences                   | 213196                               |
| Total Bases                       | 53.5 Mbp                             |
| Sequences flagged as poor quality | 0                                    |
| Sequence length                   | 208-251                              |
| %GC                               | 53                                   |



b)

Basic Statistics

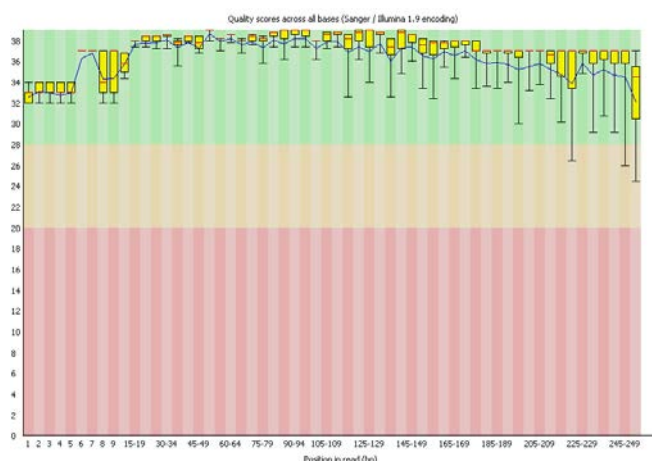
| Measure                           | Value                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Filename                          | AGmaterialMIX_S2_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls               |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9                 |
| Total Sequences                   | 253319                                |
| Total Bases                       | 63.5 Mbp                              |
| Sequences flagged as poor quality | 0                                     |
| Sequence length                   | 106-251                               |
| %GC                               | 55                                    |



b)

Basic Statistics

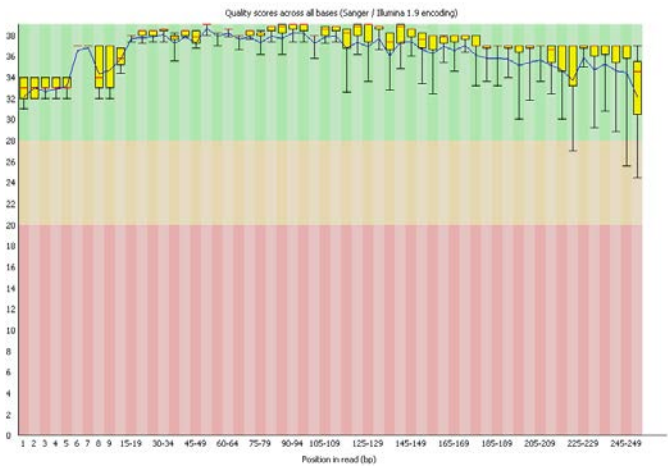
| Measure                           | Value                         |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Filename                          | A2PVA_S1_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls       |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9         |
| Total Sequences                   | 185305                        |
| Total Bases                       | 46.5 Mbp                      |
| Sequences flagged as poor quality | 0                             |
| Sequence length                   | 248-251                       |
| %GC                               | 54                            |



е)

Basic Statistics

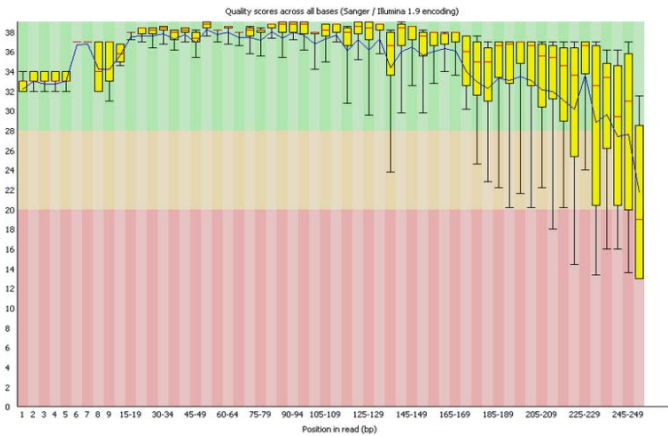
| Measure                           | Value                         |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Filename                          | C3PVA_S2_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls       |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9         |
| Total Sequences                   | 165082                        |
| Total Bases                       | 41.4 Mbp                      |
| Sequences flagged as poor quality | 0                             |
| Sequence length                   | 97-251                        |
| %GC                               | 54                            |



д)

Basic Statistics

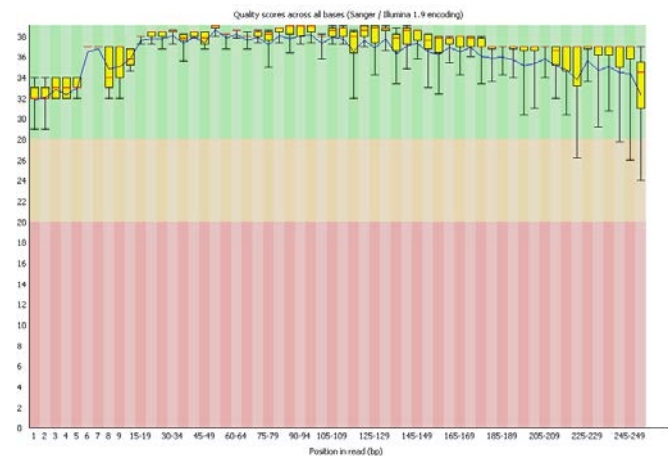
| Measure                           | Value                            |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Filename                          | E1minMed_53_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls          |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9            |
| Total Sequences                   | 208549                           |
| Total Bases                       | 52.3 Mbp                         |
| Sequences flagged as poor quality | 0                                |
| Sequence length                   | 248-251                          |
| %GC                               | 54                               |



е)

Basic Statistics

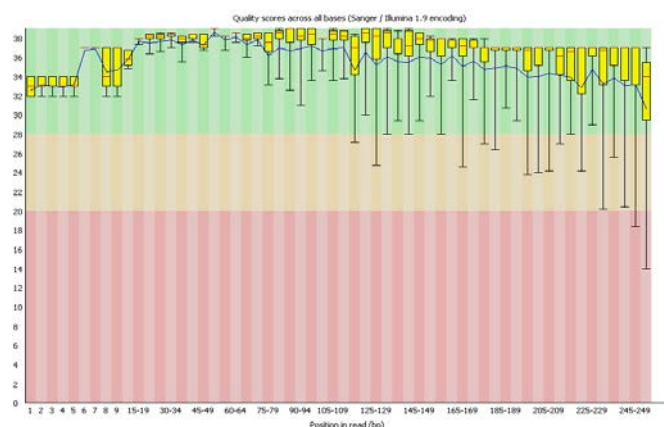
| Measure                           | Value                         |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Filename                          | F2PVA_S3_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls       |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9         |
| Total Sequences                   | 196938                        |
| Total Bases                       | 49.4 Mbp                      |
| Sequences flagged as poor quality | 0                             |
| Sequence length                   | 97-251                        |
| %GC                               | 54                            |



ж)

### Basic Statistics

| Measure                           | Value                             |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Filename                          | E2Acrlate_S4_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls           |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9             |
| Total Sequences                   | 179762                            |
| Total Bases                       | 45.1 Mbp                          |
| Sequences flagged as poor quality | 0                                 |
| Sequence length                   | 248-251                           |
| %GC                               | 54                                |



з)

### Basic Statistics

| Measure                           | Value                               |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Filename                          | FallAcrlate_S5_L001_R1_001.fastq.gz |
| File type                         | Conventional base calls             |
| Encoding                          | Sanger / Illumina 1.9               |
| Total Sequences                   | 193880                              |
| Total Bases                       | 48.6 Mbp                            |
| Sequences flagged as poor quality | 0                                   |
| Sequence length                   | 165-251                             |
| %GC                               | 54                                  |

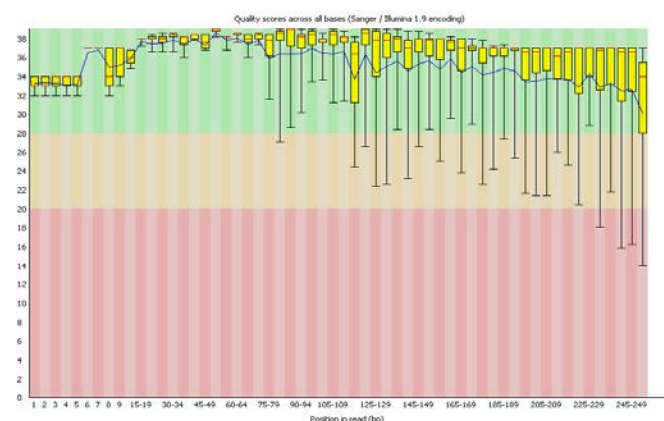


Рис. 1. Результаты анализа качества прочтений проб D-MC (а), AG-Mix (б), A2 PVA (в), СЗ PVA (г), E1 PVA (д), F2 PVA (е), E1 SA (ж) и F2 SA (з). Показатель «Quality score» (Q) показывает качество прочтений каждого нуклеотида во всех отсеквенированных фрагментах ДНК участка гена 16S рРНК бактерий. Качество прочтений рассчитывали по формуле  $Q = 10\log_{10}P$ , где  $P$  – вероятность ошибки секвенирования. Например, если  $P = 0,001$ , то  $Q = 30$ . Это означает, что только 1 нуклеотид из 1000 может быть встроен в цепь ДНК ошибочно. Поэтому  $Q = 30$  является пороговым значением для результатов секвенирования с высоким уровнем доверия. Желтые маркеры показывают интервал значений  $Q$  по всем прочтениям выборки, красные метки – среднее значение  $Q$ , рассчитанное на основе интервала значений  $Q$ . Черные «хвосты» указывают на теоретически возможный разброс значений с учетом полученных интервальных значений  $Q$ . Перечисленные параметры являются результатом более сложных расчетов, основанных на  $Q$ -весах матрице, откалиброванной производителем, согласно модели секвенатора и передаваемой программе FastQC в соответствующей кодировке, в данном случае – Sanger/Illumina 1.9

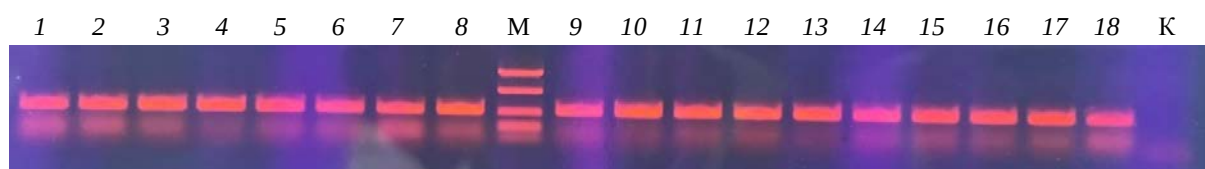


Рис. 2. Результат амплификации участка гена 16S рРНК размером 375 пар нуклеотидов с олигонуклеотидными праймерами PSF2 и PAGES-R, специфичными для бактерий рода *Pseudomonas*. М – маркер длин фрагментов ДНК (#SM1103), К – отрицательный контроль реагентов ПЦР, 1–18 – номера колоний

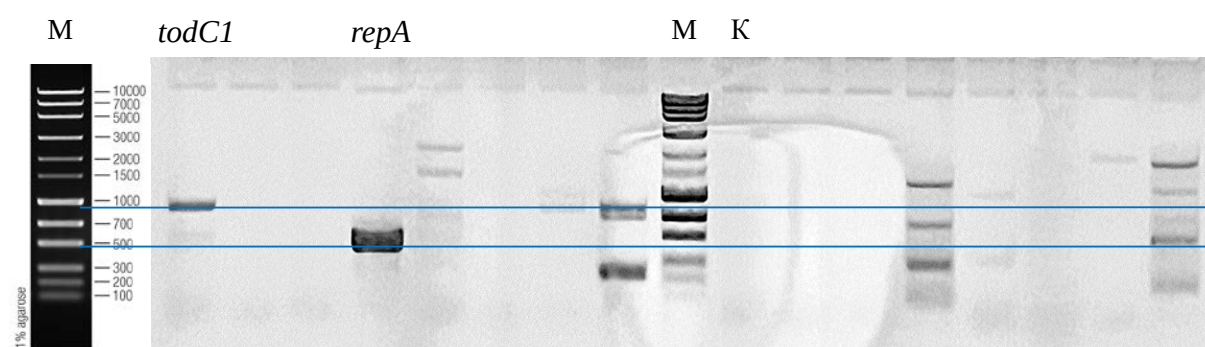


Рис. 3. Результат амплификации ДНК-фрагментов для генов *todC1* (757 пар нуклеотидов) и *repA* (480 пар нуклеотидов). М – маркер длин фрагментов ДНК (#SM1283), К – отрицательный контроль реагентов ПЦР

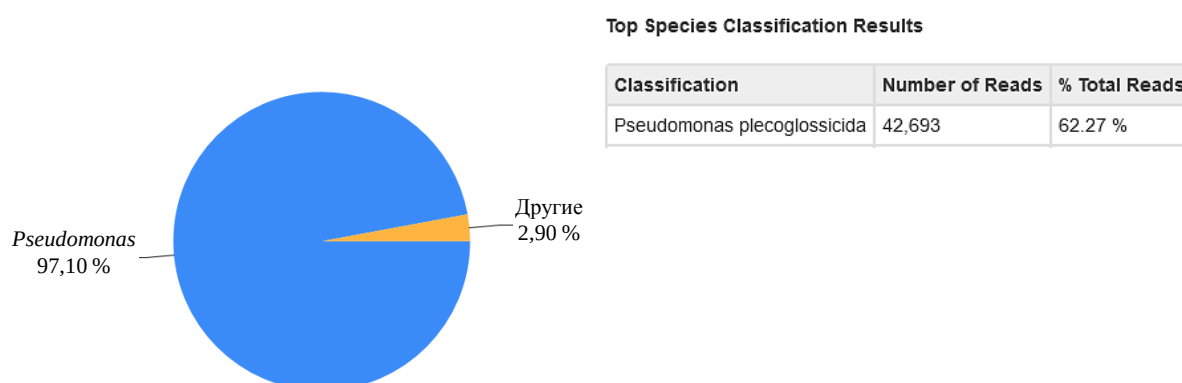


Рис. 4. Результат идентификации по V4-фрагменту 16S рРНК штамма *Pseudomonas plecoglossicida*. Для идентификации использовали культуру, полученную из отдельной колонии. Незначительная примесь посторонних прочтений (2,9 %) связана с экстремально высокой чувствительностью высокопроизводительного секвенатора, который предназначен для анализа сложных сообществ микроорганизмов. Если в смеси присутствует слишком большое количество одинаковых прочтений, могут возникнуть артефакты, связанные с указанной спецификой оборудования

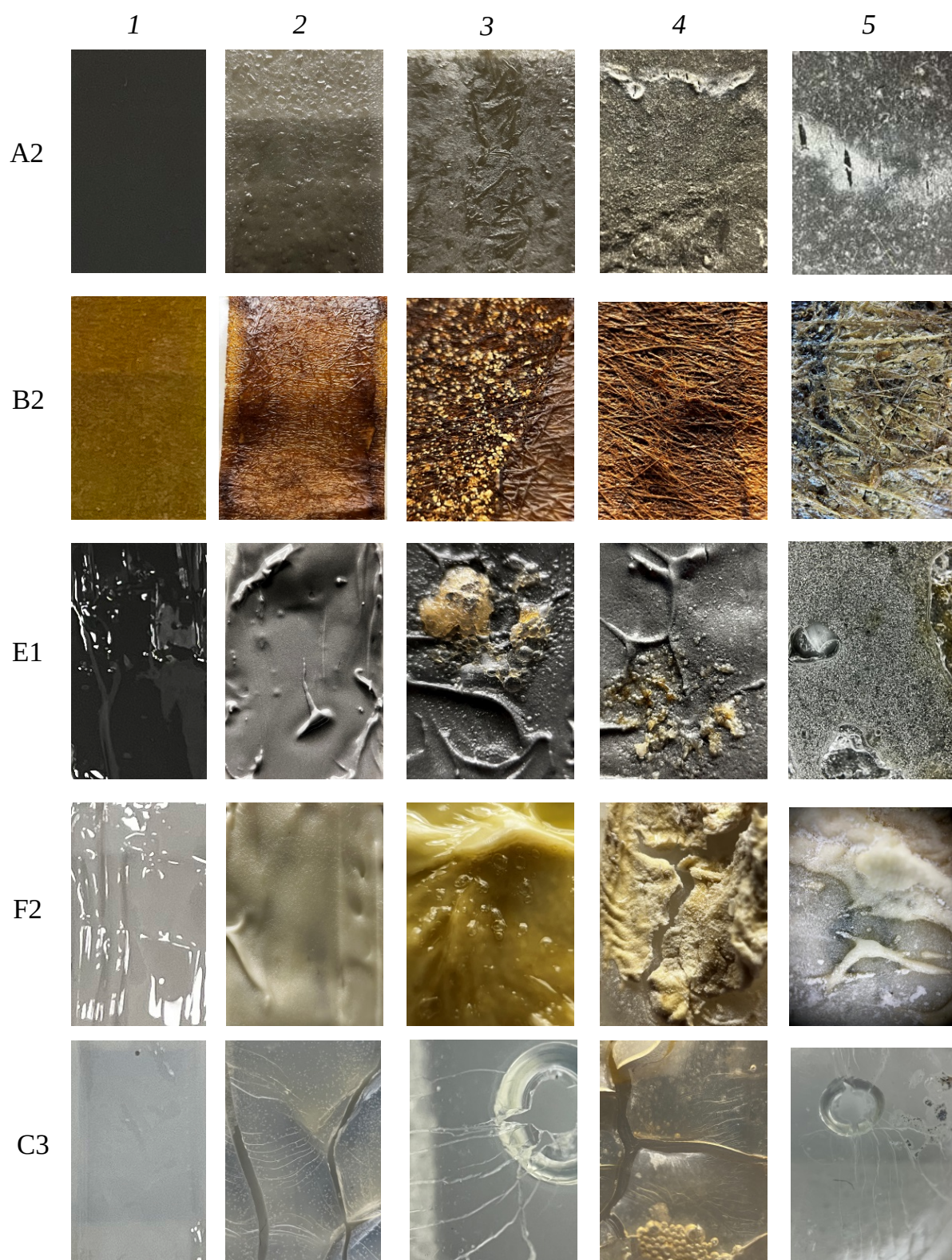
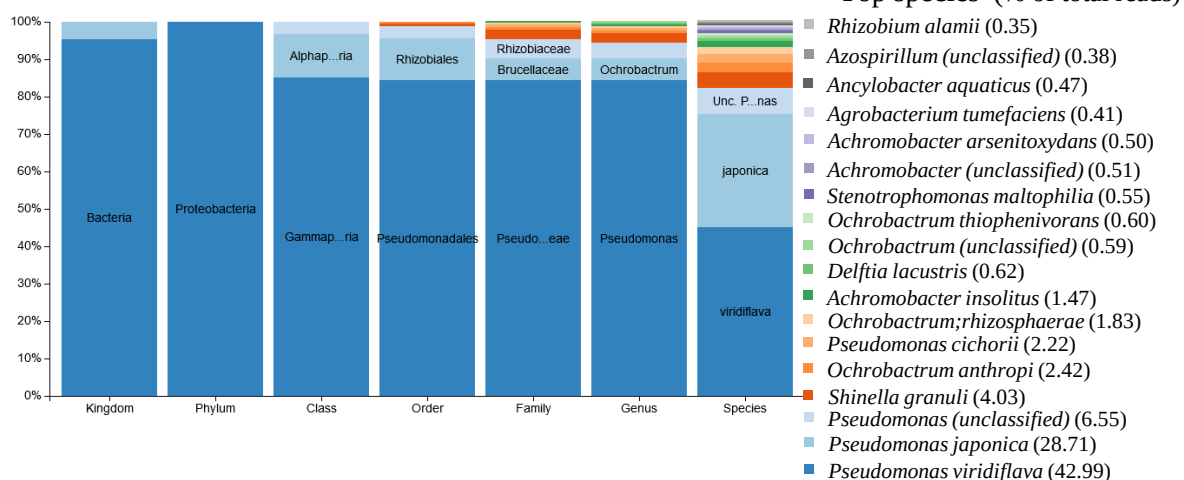
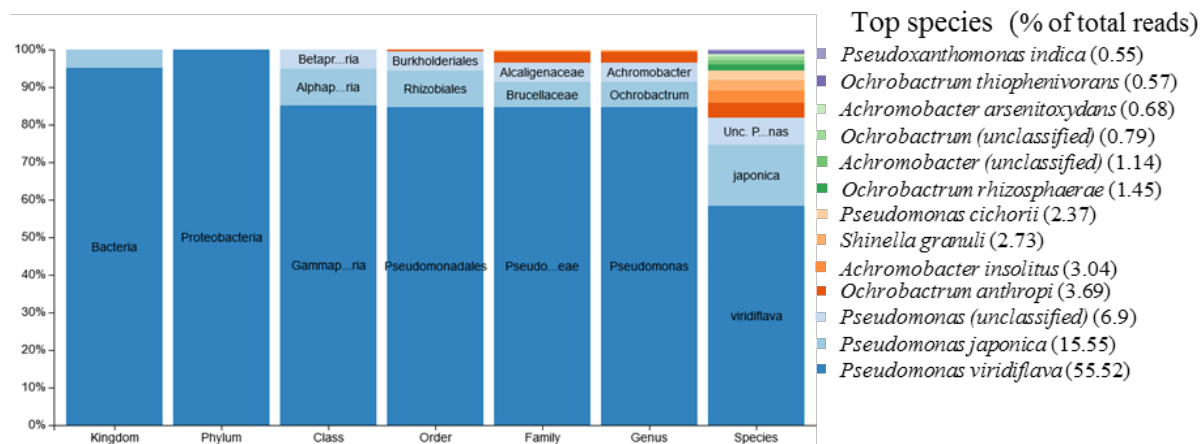


Рис. 5. Образцы материалов A2, B2, E1, F2 и C3, использованных для экспонирования с бактериальными культурами: 1 – исходные; 2 – после воздействия соляной кислоты и первой выдержки в камере светопогоды; 3 – после второй выдержки в камере светопогоды; 4, 5 – после экспонирования с культурами микроорганизмов

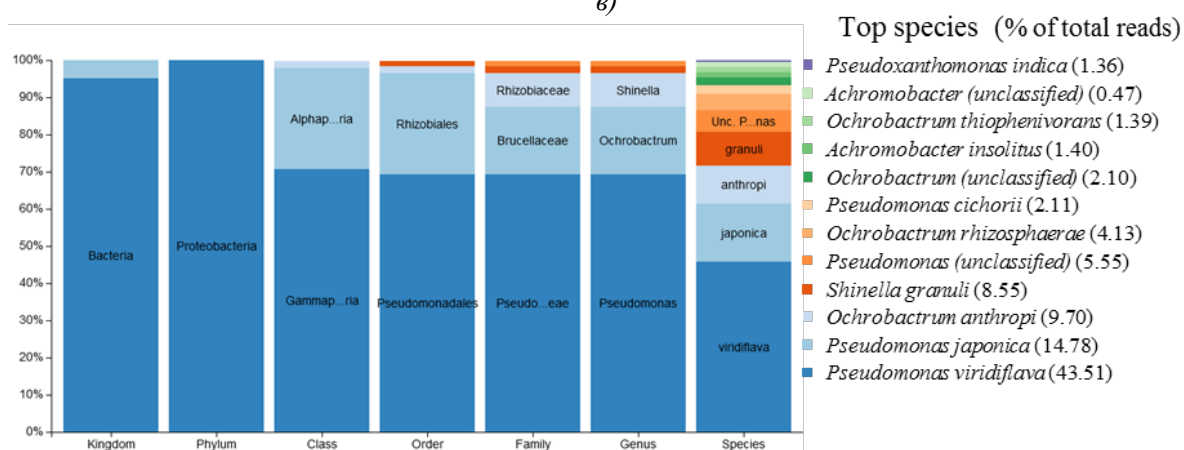
a)



б)



в)



е)

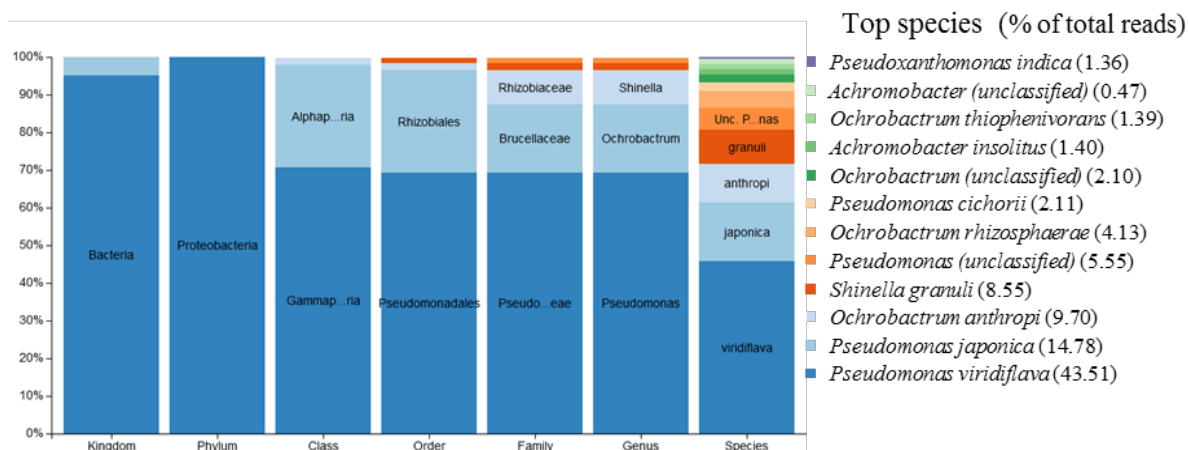


Рис. 6. Видовые составы проб A2 PVA (а), СЗ PVA (б), F2 PVA (в) и F2 SA (г) с указанием абсолютного количества прочтений V4-фрагмента 16S рРНК в процессе секвенирования (% of total reads)

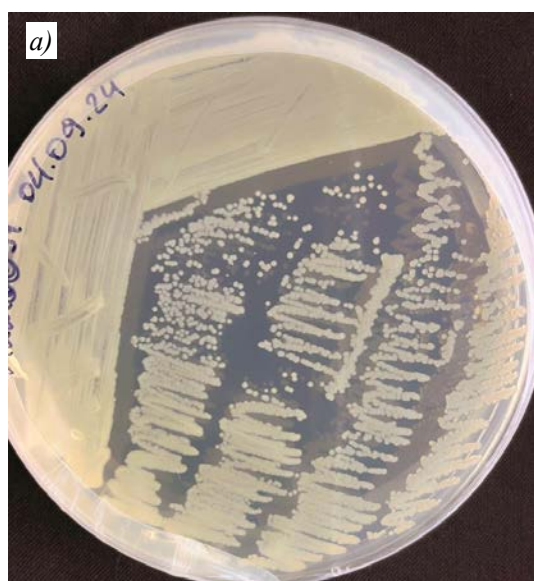


Рис. 7. Чистые культуры бактериальных штаммов *Pseudomonas plecoglossicida* (а) и *Pseudomonas japonica* PQ432336 (б)



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт  
авиационных материалов



## НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



- Реализует полный инновационный цикл – от фундаментальных и прикладных исследований до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов нового поколения, полуфабрикатов и уникального технологического оборудования.
- Разрабатывает и поставляет широкую номенклатуру металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов и средств защиты от коррозионных поражений и биоповреждений с возможностью осуществления поставки продукции под контролем ВП МО РФ.

На основании одобренного Президентом Российской Федерации В.В. Путиным принципа создания отрасли малотоннажных производств в материаловедческих НИИ и ГНЦ в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создано:

**25** высокотехнологичных  
наукоемких производств по выпуску  
**253** наименований материалов  
и полуфабрикатов

## ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

- Включает 19 комплексов уникальной стендовой и испытательной базы.
- Проводит более 1000 видов исследований и испытаний на 1100 единицах исследовательского и испытательного оборудования.
- Аккредитован в качестве технически компетентного центра Росавиацией, Росаккредитацией, Российским морским регистром судоходства, Филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, признан компанией Snecma группы SAFRAN.
- Включен в международную сеть станций климатических испытаний Atlas Material Testing Technology LLC.



национальная  
система  
аккредитации  
инфраструктура  
доверия



Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»



Разработка технологий и производство  
полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

Геленджикский центр климатических  
испытаний ВИАМ им. Г.В. Акимова –  
НИЦ «Курчатовский институт»



Единственный в России соответствующий международным  
стандартам центр климатических испытаний материалов,  
средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений  
при одновременном воздействии нагрузок и коррозионной среды.

Воскресенский экспериментально-технологический  
центр по специальным материалам ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»



Разработка технологий и производство бериллийсодержащих  
сплавов, полимерных связующих, препрегов, материалов  
для безэховых камер.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)





## ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ, РАКЕТНО- КОСМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

### ПЕРВЫЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА



Производство ответственных деталей авиационной, ракетно-космической и энергетической техники по технологиям селективного лазерного сплавления, селективного электронно-лучевого сплавления, прямого лазерного выращивания, электродуговой наплавки проволоки, а также лазерной стереолитографии керамических паст

до **10 000** шт. в год

Серийное производство металлопорошковых композиций (МПК) на основе реактивных и неактивных металлов и сплавов

до **190 000** кг в год

Решение научных и технических задач в области порошковой металлургии и аддитивного производства, разработка полного цикла изготовления заготовок с применением передовых аддитивных технологий и перспективных методов проектирования.

### ПРЕИМУЩЕСТВА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ:

- возможность изготовления сложнопрофильных деталей с внутренними каналами, в том числе бионического дизайна, за один технологический цикл;
- увеличение коэффициента использования металла – до 0,9;
- сокращение цикла производства деталей методом СЛС в 7–10 раз по сравнению с традиционными технологиями изготовления.



### МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку технологий изготовления деталей методами СЛС, СЭЛС, ПЛВ, ЭдНП и лазерной стереолитографии;
- масштабирование и трансфер технологий на промышленные предприятия;
- общую квалификацию (паспортизацию) синтезированных материалов;
- серийную поставку МПК на основе никеля, титана, кобальта, железа, меди, алюминия и др.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)



## АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ФРЕТТИНГОСТОЙКИЕ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ВАП-2, ВАП-4, ВФП-5

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ  
СКОЛЬЖЕНИЯ, УЗЛОВ С ВОЗВРАТНО-  
ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ, ШАРНИРНЫХ  
ПОДШИПНИКОВ, ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, СИСТЕМ  
ТРОСОВОЙ ПРОВОДКИ, СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕГКОСТИ СБОРКИ И РАЗБОРКИ  
УЗЛОВ, В НОМИНАЛЬНО НЕПОДВИЖНЫХ  
СОЧЛЕНЕНИЯХ ПРИ НАЛИЧИИ  
ОТНОСИТЕЛЬНЫХ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Производственные мощности

до **800** кг покрытий  
в год

### ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- работоспособны при температурах от -130 до +250°C, на воздухе, в вакууме, в средах минеральных масел, керосиновых топлив, смазок на минеральной основе, гидрожидкостей, синтетических масел;



- покрытия не вызывают коррозии сплавов и не защищают от нее;
- способ нанесения — окунанием, кистью, наливом, краскопультом;
- обеспечивают коэффициент трения всухую  $\leq 0,1$ ;
- оптимальная толщина покрытия 25–30 мкм;
- покрытия способны к шлифованию чугунами притирами или твердо-анодированными алюминиевыми сплавами.

### МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- покрытия для деталей из стальных, алюминиевых, титановых сплавов, бронзы и латуни, применяемые в автомобильной, сельскохозяйственной, авиационной и космической промышленности, работающие в экстремальных условиях, при которых неэффективно применение масел и пластичных смазок.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ  
ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМИ ЗАЩИТНЫМИ  
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ,  
КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,  
КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ  
ОБРАЗЦОВ И ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИЙ

Производственные мощности

до **2500** кг паст  
в год



### МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- пасты: для удаления продуктов коррозии с деталей из алюминиевых сплавов (ВИП-А), сталей, в том числе коррозионностойких (ВПРГ-1, ВПТ-1, ВПТ-1И, ВПС-К), для местного химического оксидирования деталей из алюминиевых сплавов (ВПО-А), для подготовки поверхности деталей из титановых сплавов под нанесение лакокрасочных покрытий (ВПФ-Т, ВФС-3), для локального фосфатирования цинкового или кадмиевого металлического покрытия (ВФС-2);
- коррозионные испытания: легких сплавов и сталей (ускоренные и натурные), на стойкость к воздействию различных климатических факторов и агрессивных газовых сред, на стойкость к высокотемпературной коррозии, агрессивности бензинов, топлив, масел.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)

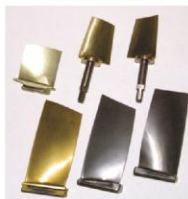


## ЖАРОСТОЙКИЕ, ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ, ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО И ПОСТАВКА  
СЕРИЙНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ: АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ  
УСТАНОВКИ ТИПА МАП (МАП-2, МАП-2М,  
МАП-3, МАП-5), УОКС-3.

ПРОИЗВОДСТВО РАСХОДНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ: КАТОДЫ И МИШЕНИ.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ располагает опытно-серийным комплексом оборудования для реализации полного цикла нанесения защитных (в том числе теплозащитных) покрытий на охлаждаемые и неохлаждаемые лопатки ГТД, ГТУ, ГПА.



Цилиндрический  
металлический катод



Вакуумная ионно-плазменная установка  
МАП-3



Установка среднечастотного магнетронного  
напыления УОКС-3

### МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- защитные жаростойкие и теплозащитные покрытия с рабочей температурой до 1200°C (с забросами до 1250°C);
- эрозионностойкие покрытия для защиты от пылевой эрозии деталей ГТД и ЛА, повышающие эрозионную стойкость защищаемого материала до 10 раз;
- коррозионностойкие и антифреттинговые покрытия, работоспособные при температурах до 650°C;
- трибологические и износостойкие покрытия, работоспособные при температурах до 800°C.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

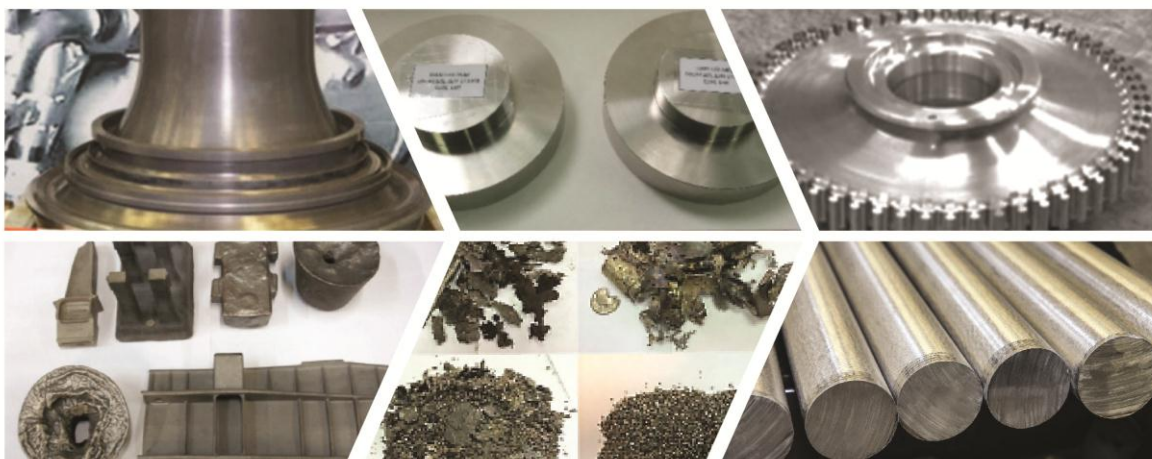
на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)



**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ,  
ГРАНУЛИРУЕМЫЕ, СВАРИВАЕМЫЕ  
ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ  
ДЛЯ ДИСКОВ ТУРБИН И ДЕТАЛЕЙ ГОРЯЧЕГО ТРАКТА  
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК**

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПЕРЕРАБОТКИ ДО 100% ОТХОДОВ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ И СЕРИЙНЫХ  
ДЕФОРМИРУЕМЫХ (ВЖ175, ВЖ172)  
И ЛИТЕЙНЫХ (ВЖМ4, ВЖМ5, ЖС32,  
ЖС26, ЖС6У, ЖС6К, ЖСЗДК, ВЖЛ12У,  
ВХ4Л и др.) ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ.**



**ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ ПОЗВОЛИТ:**

- увеличить рабочую температуру деталей;
- снизить массу деталей на 10–20%;
- повысить ресурс деталей в 2–3 раза.

**МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:**

- разработку материалов и технологий на заданные параметры;
- поставку полуфабрикатов из сплавов ВЖ171, ВЖ172, ВЖ175, ВЖ178П;
- передачу лицензий на сплавы и технологии.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)



**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ  
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ: ДЕТАЛИ ТУРБИН  
ГТД, МГТД, ВСУ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ДВС ТЕПЛОВЗОВ**

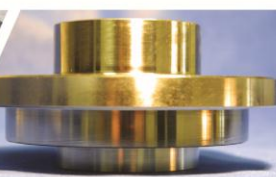
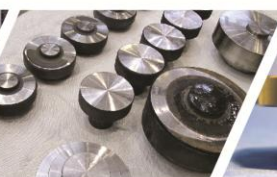
**ШТАМПОВКИ ДИСКОВ ДИАМЕТРОМ  
ДО 300 мм ИЗ СПЛАВОВ ЭИ698, ЭИ787,  
ЭП742, ЭП718, ЭК79, ЭК151, ЭП975,  
ВЖ175 и др.**

**ШТАМПОВКИ ДИАМЕТРОМ ДО 400 мм  
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ8, ВТ8-1,  
ВТ18, ВТ18У, ВТ25У, ВТ41 и др.**



Осуществляется серийная поставка заготовок дисков

более **2500** шт. в год



**МЕТОД ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ  
НА ВОЗДУХЕ ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ:**

- увеличение КИМ в 2–3 раза;
- снижение трудоемкости и энергоемкости в 3–5 раз;
- повышение производительности в 10–15 раз.



**ЗАЩИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ:**

- увеличение ресурса работы штамповой оснастки в 3–5 раз.

Производственные мощности

более **30** марок покрытий  
в год

до **40 000** кг в год

**МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:**

- изготовление опытно-промышленных и серийных партий штамповок дисков и других деталей, в том числе из труднодеформируемых высокожаропрочных и высоколегированных сплавов;
- покрытия для термической обработки и изотермической штамповки на воздухе деталей и конструкций из высокопрочных сталей, никелевых, алюминиевых и титановых сплавов.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)



## МАГНИЕВЫЕ И ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО НАБОРА

РЕШЕНИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ  
В ОБЛАСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ,  
КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ, ЖАРОПРОЧНЫХ  
МАГНИЕВЫХ И ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВОВ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ  
ПОЛУФАБРИКАТОВ И ДЕТАЛЕЙ  
ИЗ МАГНИЕВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВОВ



Производственные  
мощности

**35 000** кг магниевого  
литья в год

**35 000** кг алюминиевого  
литья в год

**10 000** кг противопригарной присадки  
в год



Освоен полный технологический цикл изготовления отливок.



### МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- отливки из серийных и новых магниевых и алюминиевых сплавов различной номенклатуры по передаваемой или изготавливаемой оснастке – ВМЛ18, ВМЛ20, ВМЛ25, ВМЛ26, АЛ4МС, ВАЛ20, ВАЛ16;
- противопригарный присадочный материал для песчано-глинистых смесей – ВМ-У.

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.viam.ru](http://www.viam.ru)

---

## ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

1. Рукопись предоставляется в Редакционно-издательский отдел НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на бумажном и электронном носителях (программное обеспечение не ниже Windows'2003).

2. На рукопись должно быть оформлено Экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати.

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

4. К каждой рукописи на отдельной странице на русском и английском языках предоставляется реферат (объемом 500–600 знаков, включая пробелы), в котором кратко излагается основное содержание работы, и ключевые слова.

5. Фамилии авторов и название статьи должны иметь перевод на английский язык.

6. К рукописи должен быть приложен список авторов с указанием фамилии, имени, отчества (полностью), должности, номера телефона и адреса электронной почты.

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

- заголовок статьи;
- сведения об авторах;
- реферат;
- ключевые слова;
- введение;
- материалы и методы;
- результаты;
- обсуждение и заключения;
- благодарности (при необходимости);
- список литературы.

8. Рекомендуемый объем рукописи от – 15 000 до 30 000 знаков, включая пробелы.

9. Основные технические параметры рукописи:

- шрифт – Times New Roman;
- размер шрифта – 12;
- интервал – 1,5;
- поля: верхнее – 2; нижнее – 2,5; левое – 2,5; правое – 2,5;
- автоматическая расстановка переносов;
- набор формул в Microsoft Equation 3.0;
- штриховые рисунки должны быть выполнены в программе Microsoft Power Point или Microsoft Excel. На каждый рисунок должна быть ссылка в тексте;
- микроструктуры, фотографии приборов, оборудования должны быть представлены в электронном виде в программе Photoshop JPEG;
- размер иллюстраций не должен превышать формат А4;
- таблицы должны быть выполнены в программе Microsoft Word, пронумерованы и иметь тематические заголовки. На каждую таблицу должна быть ссылка в тексте;
- единицы измерения физических величин должны быть приведены в системе СИ.

10. Форма подачи рукописи:

- текст на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом;
- пронумерованные рисунки на бумажном носителе и в электронном виде отдельными файлами;
- пронумерованные подписи к рисункам на бумажном носителе и в электронном виде отдельным файлом.

11. Список литературы, завершающий рукопись, должен быть тщательно выверен и унифицирован в соответствии с ГОСТ 7.0.5–2008.

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

Последовательность ссылок в тексте должна строго соответствовать последовательности приведенного списка литературы.

Ссылки на неопубликованные работы (отчеты научно-исследовательских учреждений и заводов, стандарты предприятия и т. п.) не допускаются.

Допускается не более одной ссылки на работы, принятые к печати, с указанием номера издания, в котором планируется публикация.

*Соблюдение данных правил облегчает работу научного редактора, рецензента и редактора, ускоряет подготовку статьи к печати.*

*По рекомендации научного редактора или рецензента статья может быть направлена авторам на доработку. После доработки авторы должны представить в редакцию первоначальный и доработанный варианты статьи с ответами на все вопросы и замечания научного редактора или рецензента.*

*Статья, находящаяся на доработке у авторов более одного месяца, рассматривается и принимается к публикации как вновь поступившая.*

---

# **ТРУДЫ ВИАМ**

## **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09  
E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
[www.ВИАМ.РФ](http://www.ВИАМ.РФ); [www.viam.ru](http://www.viam.ru)