

№7
(137)
2024

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

№ 7 (137) июль 2024

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» – ВИАМ)

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; 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. Гранулирование модельных композиций производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для литья по выплавляемым моделям

3

Легкие сплавы

Асташкин А.И., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и технологическую пластичность слитков из алюминиевого сплава 1163

12

Крохина В.А., Арисланов А.А., Путьрский С.В. Исследование механических свойств и структуры штамповок из сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом в β -область

24

Композиционные материалы

Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Старцев В.О. Исследование климатической стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органопластика

34

Артемов Н.С., Капустянская М.А., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносов А.О. Исследование влияния температурных режимов отверждения на физико-механические свойства двухкомпонентного сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-7М

45

Heat-resistant alloys and steels

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

Light-metal alloys

Astashkin A.I., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. The influence of homogenization annealing on the structural phase evolution and technological plasticity of aluminum alloy 1163 ingots

Krokhina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V. Investigation of the mechanical properties and structure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the β -area

Composite materials

Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Startsev V.O. Research of the climate stability of hybrid layered metal polymer materials based on aluminium and aramid organoplastics

Artyomov N.S., Kapustianskaia M.A., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O. Research of the influence of curing temperature conditions on the physical and mechanical properties of two-component cold curing spheroplastic VPZ-7M

**Защитные и функциональные
покрытия**

**Антипов В.В., Будиновский С.А., Бен-
клян А.С., Татарников С.В.** Прогнозиро-
вание срока службы защитных ионно-
плазменных покрытий по результатам ис-
пытаний на жаростойкость

**Protective and functional
coatings**

56 **Antipov V.V., Budinovskiy S.A., Ben-
klyan A.S., Tatarnikov S.V.** Predicting the
service life of protective ion-plasma coatings
based on the results of heat resistance tests

Испытания материалов

Кривушина А.А., Коган А.М., Старцев В.О. 66
Сохраняемость свойств лакокрасочных по-
крытий после воздействия климатических
факторов и микромицетов-деструкторов

Material tests

Krivushina A.A., Kogan A.M., Startsev V.O. 66
Preservation of the properties of paint coatings
after exposure to climatic factors and micro-
mycetes-destructors

**Старцев О.В., Скирта А.А., Старцев В.О.,
Валевин Е.О., Двирная Е.В.** Сравнение
свойств углепластиков и стеклопластиков
на основе связующего ВСЭ-1212 после
экспонирования в различных климатиче-
ских зонах

77 **Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O.,
Valevin E.O., Dvirnaya E.V.** Comparison of
the properties of carbon fiber reinforced plas-
tics and glass fiber reinforced plastics based
on the VSE-1212 binder after exposure to dif-
ferent climatic zones

Научная статья

УДК 621.74.045

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11

ГРАНУЛИРОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ*Т.Л. Форостович¹, А.Р. Нарский¹, О.Н. Битюцкая¹, Н.А. Мокеев¹*

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

Аннотация. Рассматриваются технологии изготовления современных высококачественных модельных композиций типа ВИАМ на основе отечественного сырья для получения деталей методом литья по выплавляемым моделям. Результаты экспериментальных исследований, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, по изучению возможности гранулирования модельных композиций позволили улучшить технологичность процесса их изготовления. Благодаря высокой насыпной плотности полученные гранулы позволили упростить как загрузку прессового оборудования, так и фасовку для последующего хранения.

Ключевые слова: модельные композиции, воск, пластификатор, нефтеполимерная смола, точное литье, жаропрочные сплавы, гранулирование

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.

Scientific article

GRANULATION OF MODEL COMPOSITIONS PRODUCED BY NATIONAL RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE» – VIAM FOR CASTINGS ON SMELTED MODELS*T.L. Forostovich¹, A.R. Narsky¹, O.N. Bityutskaya¹, N.A. Mokeev¹*

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

Abstract. The technological issues of manufacturing modern high-quality model compositions of the VIAM type based on domestic raw materials for the production of parts by casting on smelted models are considered. The results of experimental studies conducted at the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, to study the possibility of granulating model compositions made it possible to improve the manufacturability of their production process. The resulting granules, due to their high bulk density, made it possible to simplify both the loading of pressing equipment and packaging for subsequent storage.

Keywords: model compositions, wax, plasticizer, petroleum polymer resin, precision casting, superalloys, granulation

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-3-11.

Введение

Широкую номенклатуру деталей различного назначения изготавливают как в России, так и за рубежом, чаще всего методом точного литья по выплавляемым моделям. Этот метод позволяет получать требуемую отливку любой, в том числе сложной, конфигурации с высокой точностью размеров. Поскольку дополнительная обработка полученной отливки практически не требуется, то трудоемкость и себестоимость литейного производства оказывается значительно ниже, чем при изготовлении аналогичных деталей другими способами. Так, литьем по выплавляемым моделям получают различные детали авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок. Важнейшее значение среди таких деталей имеют лопатки из никелевых жаропрочных сплавов [1–4]. Они подвергаются действию целого комплекса термических и механических нагрузок, поэтому надежность лопаток определяет максимальную продолжительность эксплуатации двигателя [5]. Работоспособность рабочих и сопловых лопаток обеспечивается системой их охлаждения, так как температура газа на входе в турбину намного выше температуры плавления жаропрочных сплавов [6].

Изготовление образцов и деталей методом литья по выплавляемым моделям состоит из следующих стадий: изготовление модели детали и литниково-питающей системы в пресс-формах; отделка моделей; соединение моделей в блоки; послойное нанесение огнеупорной керамической суспензии, состоящей из связующего и наполнителя, с обсыпкой каждого слоя шлифпорошком и просушкой, т. е. получение оболочковой формы; удаление модели из формы; прокалка оболочковой формы; заливка оболочки жаропрочным сплавом.

Физико-химические свойства и качество модельных композиций оказывают решающее влияние на геометрическую точность и класс чистоты поверхности отливки, получаемой точным литьем [7]. Отсюда главное требование к модельным композициям – обязательное обеспечение высокого качества литых деталей при одновременном удобстве применения (технологичности). Оптимальный состав модельной композиции должен основываться на принципе использования недефицитных материалов и минимизации числа компонентов. Модельная композиция должна также иметь хорошую текучесть в пастообразном состоянии, невысокую и стабильную усадку; обладать прочностью и твердостью для недопущения деформации и повреждения моделей; не взаимодействовать химически с материалом пресс-формы и со связующим; обладать хорошей смачиваемостью, минимальной зольностью для большей полноты выгорания при прокалке форм и недопустимости образования поверхностных дефектов на отливке; иметь невысокую температуру плавления для обеспечения хорошей заполняемости пресс-формы в процессе изготовления моделей и простоты их удаления из оболочковой формы. При выборе модельной композиции дополнительно учитывают такие параметры, как легкость припаивания, возможность регенерации и отсутствие вредных компонентов [2, 3, 8].

В СССР в промышленных масштабах при литье по выплавляемым моделям использовали воскообразные выплавляемые парафино-стеариновые модельные составы, такие как ПС 50-50 и ПС 70-30, а также состав с добавлением этилцеллюлозы ПСЭ 70-25-5 [2]. Модели на основе природных сырьевых материалов (минеральных восков, нефти, торфа, каменного угля) несколько десятилетий являлись основными в отечественной авиационной промышленности, где практически все пресс-формы были рассчитаны на использование этих композиций.

Но несмотря на хорошие реологические свойства в пастообразном состоянии, составы отличались малой теплостойкостью ~35 °С. Более того, стеарин мог вступать

в реакцию с растворителями этилсиликатного связующего, входящего в состав керамической суспензии.

Получение более точных моделей, не взаимодействующих с компонентами суспензии и водой при их удалении из оболочковой формы, было обеспечено новыми составами, в основу которых входили синтетические полимеры, полиэтиленовые воски – например, состав ПВ-200. Они оказывали положительное влияние на прочность и термоустойчивость моделей. Самый известный состав марки ВИАМ-102 (парафин, буроугольный воск, торфяной воск, триэтаноламин) впоследствии был снят с производства из-за дефицита торфяного воска. Опыт применения подобных модельных масс в промышленности показал ряд их недостатков, таких как низкая смачиваемость суспензией, высокие коэффициент термического расширения и зольность, склонность к трещинообразованию.

Постоянно возрастающие требования к качеству поверхности литых деталей и размерной точности приводили, в свою очередь, к непрерывному повышению требований к качеству применяемых модельных композиций и совершенствованию технологических процессов их изготовления и нанесения керамического покрытия на модельные блоки. Но отечественные научно-исследовательские работы в области разработки новых модельных композиций в конце 1980-х гг. были прекращены, большинство двигателестроительных заводов оказались вынуждены работать с импортными модельными составами. Чаще всего для изготовления рабочих и сопловых лопаток, деталей соплового аппарата, камеры сгорания газотурбинного двигателя применяли модельные композиции производства США и Великобритании [8]. Они представляли собой твердые растворы олигомеров в предельных углеводородах разной степени насыщения – например, парафин и церезин с пластификатором сэвиленом (сополимер этилена с винилацетатом) и упрочняющими добавками – полимерными смолами.

Материалы и методы

Возобновление исследований и создание модельных композиций нового поколения на основе синтетических смол и восков низкой зольности относится к началу 2000-х гг. Всесторонние исследования, проведенные специалистами ФГУП «ВИАМ» (в настоящее время – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) и ФГУП «ММПП «Салют» (в настоящее время – производственный комплекс «Салют» АО «ОДК»), позволили разработать модельные композиции с улучшенными технологическими характеристиками на основе отечественных синтетических материалов, таких как нефте- и термополимерные смолы и их сополимеры [1, 3, 4, 7–13]: сначала – типа Салют, а затем – типа ВИАМ. На рис. 1 представлены образцы нескольких марок модельных композиций типа ВИАМ.

В современный типовой модельный состав нового поколения входят около десяти различных компонентов: парафин, воск, смолы; пластификаторы, повышающие трещиностойкость; присадки, красители; наполнители, увеличивающие прочность и стабильность готовых моделей (например, терефталевая кислота).

Разработка современных отечественных модельных композиций нацелена на устранение необходимости приобретения иностранной продукции российскими авиа- и двигателестроительными предприятиями.

В таблице представлены основные физико-механические характеристики модельных композиций типа ВИАМ: предел прочности при статическом изгибе, линейная усадка, теплоустойчивость, температура каплепадения, зольность. Они обладают также хорошей текучестью, инертностью к материалам керамической формы, устойчивостью к трещинам, нетоксичностью и технологической безопасностью [14].

Физико-механические свойства модельных композиций типа ВИАМ

Свойства	Значения свойств для модельных композиций марок			
	МК-Л	МК-1	МК-2	МК-4
Предел прочности при статическом изгибе, МПа, при температуре 20±1 °С (не менее)	4,5	7	8	4
Свободная линейная усадка, %	0,84	0,65	0,6	0,75
Теплоустойчивость, °С (не менее)	35	42	48	40
Температура каплепадения, °С	60–70	80–90	85–95	50–70
Массовая доля золы (зольность), % (не менее)	0,05	0,05	0,05	0,05

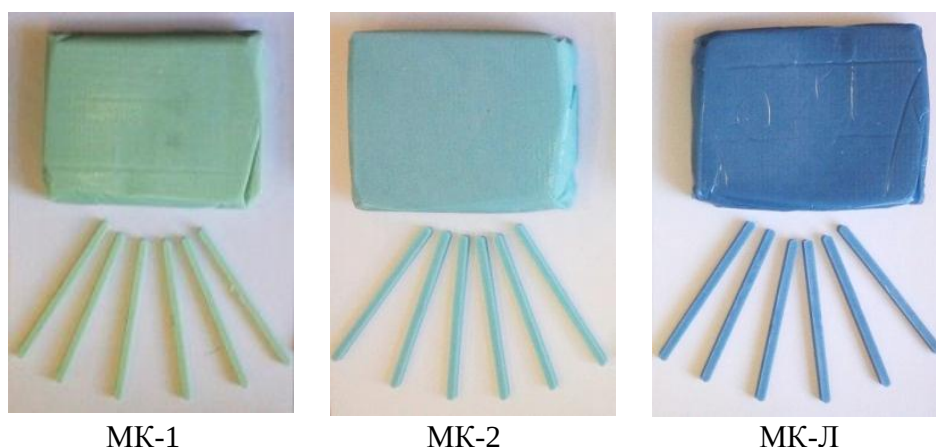


Рис. 1. Образцы отдельных модельных композиций типа ВИАМ

Модельные композиции изготавливают из отечественных синтетических материалов высокого качества, что гарантирует стабильность и высокий уровень физико-механических и технологических свойств готовой продукции, а также низкую стоимость (по сравнению с зарубежными аналогами). Таким образом, проблема импортозамещения в технологии производства современных модельных композиций была решена.

Увеличение или уменьшение температуры, давления и скорости запрессовки модельных композиций типа ВИАМ не приводит к изменению технологических свойств. Комплекс выполненных исследований позволил разработать нормативную документацию: Технические условия 1-595-1-1545–2015 (с изменением № 1) на модельные композиции и Технологическую инструкцию 1-595-1-838–2023 на изготовление модельных композиций. В 2016 г. коллектив авторов во главе с академиком РАН Е.Н. Кабловым получил патент РФ 2600468 «Композиция для изготовления выплавляемых моделей» [15].

Высокий спрос, возникший со стороны промышленных предприятий, привел к созданию в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в середине 2010-х гг. специального производственного участка по изготовлению модельных композиций нового поколения. Выпускается следующая продукция – модельные композиции марок Салют-1, Салют-2, Салют-3, Салют-4, ВИАМ МК-1, ВИАМ МК-2, ВИАМ МК-4, а также производится марка ВИАМ МК-Л, применяемая для литниково-питающих систем. Производственная мощность участка составляет 60 т в год [14]. На производственном участке для изготовления модельных композиций используют

специальную установку, состоящую из пяти смесителей и роликового конвейера (рольганга), которая в течение рабочего дня позволяет изготавливать до 250 кг различных композиций. Проверку качества готовой продукции осуществляют в специальном помещении, оснащённом необходимым испытательным оборудованием и средствами измерения: автоматическим аппаратом для определения температуры каплепадения упрочняющих компонентов; аппаратом для определения пенетрации; автоматическим прибором для определения температуры размягчения полимеров; аналитическими весами, используемыми для определения зольности; универсальной испытательной машиной для определения предела прочности при статическом изгибе; электропечью и термостатом.

Модельные композиции производятся как для внутреннего использования в цехах НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при изготовлении образцов и деталей газотурбинных двигателей, так и для поставки на следующие предприятия: ПАО «ОДК-УМПО» (Уфа), ООО «Башполимерхим» (Уфа), АО «КМПО» (Казань), АО «МПО «Металлист» (Москва), ООО «Виола Кемикал» (Москва), ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова (Москва), ООО «ПТК «Электросталь» (Москва), Иркутский авиационный завод – филиал ПАО «Яковлев» (Иркутск), Филиал ПАО «ОДК-Сатурн – ОМКБ» (Омск) и другие.

Сотрудниками лаборатории «Технологии литейных процессов жаропрочных сплавов и сталей» проведена исследовательская работа по изучению влияния процесса гранулирования на технологичность получения готовых модельных композиций типа ВИАМ. Для этого в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ приобретена и введена в эксплуатацию специальная линия грануляции, производительность которой составляет от 60 до 100 кг в смену (рис. 2).

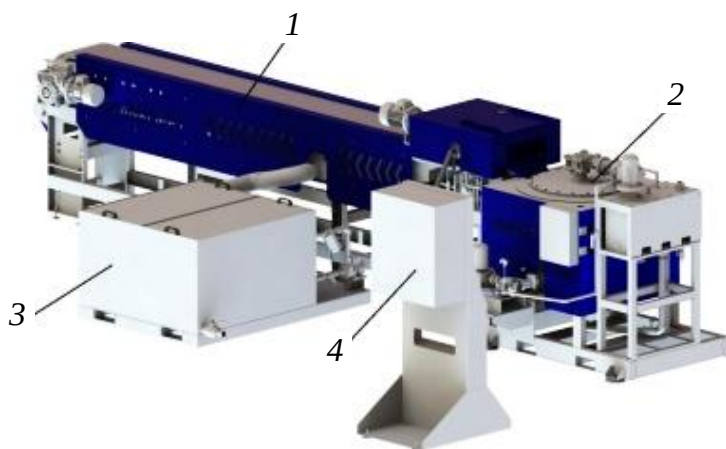


Рис. 2. Линия грануляции модельных композиций: 1 – ленточный гранулятор; 2 – бак нагрева; 3 – водяной бак охлаждения; 4 – пульт управления

Конструкция линии грануляции восков, парафинов и смол предусматривает возможность ее использования также для производства композиционных материалов на основе названного сырья.

Измельченное сырье загружается в бак нагрева для получения расплава и равномерного смешивания компонентов. Расплавленный материал далее транспортируется при помощи насоса в формующую головку. Она состоит из обогреваемого цилиндрического статора, в который подается жидкий продукт, и перфорированного кожуха, который вращается вокруг статора и распределяет капли

продукта по всей рабочей ширине стальной ленты конвейера, выполняющего также функцию охладителя.

Система распределительных каналов и внутренних форсунок, встроенных в цилиндрический статор, создает одинаковое давление по всей его ширине, что обеспечивает равномерную подачу продукта через все отверстия внешнего перфорированного кожуха. Благодаря этому по всей ширине ленты происходит формирование гранул одинаковой формы и равной прочности, при этом пылеобразование исключается. Скорость вращения формующей головки синхронизирована со скоростью движения ленты, что не допускает возможности деформации гранул при их распределении.

Тепло, выделяемое при охлаждении и кристаллизации, отводится через стальную ленту с помощью подаваемой воды, охлаждающей внутреннюю сторону ленты. Вода собирается в поддонах и возвращается в систему оборотного водоснабжения, не контактируя с продуктом. Для дополнительного охлаждения ленты в конвейер встроена также система воздушного охлаждения.

Отделение готовых охлажденных гранул модельного состава от ленты производят с помощью специального скребка. Гранулы пересыпают в зону загрузки пневмотранспорта для дальнейшей транспортировки в фасовочное оборудование.

Результаты

Проведенная работа по опробованию технологии грануляции модельных композиций типа ВИАМ позволила сделать следующие выводы. Полученные в процессе изготовления гранулы обладают хорошей сыпучестью и становятся практически идеальными как для переработки или смешивания, так и для транспортировки или хранения с целью использования в дальнейшем. Гранулирование модельных композиций позволяет осуществлять удобную загрузку в пресс, улучшая адаптированность к современным пресс-машинам. Гранулированные продукты обладают более высокой насыпной плотностью и улучшенными характеристиками для расфасовки.



Рис. 3. Смесь гранул модельных композиций типа ВИАМ

Следует отдельно отметить, что технология гранулирования – экологически чистое производство, поскольку применяемая охлаждающая среда (вода) не соприкасается с продуктом, что исключает даже малейшую возможность его загрязнения. Высокая теплопроводность стальной ленты обеспечивает небольшую продолжительность охлаждения модельных композиций, а следовательно, только немного испарений или газов может попасть в атмосферу; в то же время лишь

минимальное количество кислорода может проникнуть в продукт. Гранулы образуются непосредственно из расплава, избавляя от необходимости затрат на энергию и оборудование, связанных с последующим перемалыванием, дроблением или каким-либо иным процессом измельчения продукта. На рис. 3 представлены полученные в результате исследования гранулы различных марок модельных композиций типа ВИАМ.

Благодаря проведенной исследовательской работе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ получил возможность производить для отечественной промышленности модельные композиции как в виде плит (брикетов), так и в виде гранул.

Обсуждение и заключения

При изготовлении различных литых образцов и деталей (в том числе лопаток газотурбинных двигателей) методом литья по выплавляемым моделям свойства модельной композиции определяют точность детали и класс чистоты поверхности. Проведенные экспериментальные исследования по гранулированию модельных композиций типа ВИАМ с помощью специального оборудования (линии грануляции) позволили улучшить технологичность процесса в части подготовительной работы как перед запрессовкой в плане удобства загрузки пресса, так и при хранении, смешивании, погрузке и перемещении продукции.

Применение современных модельных композиций с улучшенными технологическими характеристиками позволяет обеспечить отечественные предприятия высококачественными материалами для изготовления лопаток газотурбинных двигателей сложной формы, различных фасонных, корпусных и иных деталей. Это способствует обеспечению более высокого выхода годных отливок.

Исключительно важно, что применение высококачественных сырьевых материалов отечественного производства позволяет полностью исключить зависимость от импорта.

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

Список источников

1. Оспенникова О.Г., Пикулина Л.В., Шункин В.Н. Модельные композиции для литья лопаток газотурбинных двигателей // Литейное производство. 2001. № 10. С. 23–24.
2. Литье по выплавляемым моделям / Под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
3. 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.
4. Оспенникова О.Г., Каблов Е.Н., Шункин В.Н. Разработка и исследование пластификатора для модельных композиций на основе природных восков // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 3. С. 68–70.
5. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Получение мелкозернистой структуры отливок из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
6. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.

7. Оспенникова О.Г. Теплофизические и реологические характеристики синтетических смол для модельных композиций // Литейное производство. 2016. № 10. С. 26–28.
8. Оспенникова О.Г. Жаропрочные сплавы нового поколения и модельные композиции для литья по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2016. № 3. С. 17–20.
9. 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: 25.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
10. Оспенникова О.Г., Хаютин С.Г. Структура модельных композиций для литья по выплавляемым моделям // Материаловедение. 2009. № 10. С. 46–51.
11. 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.
12. 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.
13. Оспенникова О.Г., Каблов Е.Н., Шункин В.Н. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2002. № 3. С. 64–67.
14. Ечин А.Б., Дейнега Г.И., Нарский А.Р. Новые разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области материалов для литейных процессов жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 8 (126). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
15. Композиция для изготовления выплавляемых моделей: пат. 2600468 С2 Рос. Федерация; заявл. 20.03.15; опубл. 10.08.16.

References

1. Ospennikova O.G., Pikulina L.V., Shunkin V.N. Model compositions for casting blades of gas turbine engines. *Liteynoe proizvodstvo*, 2001, no. 10, pp. 23–24.
2. *Lost wax casting*. Ed. Ya.I. Shklennik, V.A. Ozerova. Ed. 3rd. Moscow: Mashinostroyenie, 1984, 408 p.
3. Ospennikova O.G., Aslanyan I.R. Directions for the development of technology for manufacturing model compositions for blades and other gas turbine engine parts. *Liteynoe proizvodstvo*, 2018, no. 3, pp. 20–24.
4. Ospennikova O.G., Kablov E.N., Shunkin V.N. Development and research of a plasticizer for model compositions based on natural waxes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 3, pp. 68–70.
5. Narsky A.R., Deynega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
6. 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: March 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
7. Ospennikova O.G. Thermophysical and rheological characteristics of synthetic resins for model compositions. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 10, pp. 26–28.
8. Ospennikova O.G. New generation heat-resistant alloys and model compositions for investment casting. *Liteynoe proizvodstvo*, 2016, no. 3, pp. 17–20.
9. Guseva M.A., Aslanyan I.R. The effect of fillers on the rheology of model composition. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.

10. Ospennikova O.G., Khayutin S.G. Structure of model compositions for lost wax casting. *Materialovedenie*, 2009, no. 10, pp. 46–51
11. 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.
12. 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.
13. Ospennikova O.G., Kablov E.N., Shunkin V.N. Model compositions based on synthetic materials for casting gas turbine engine blades. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 3, pp. 64–67.
14. Echin A.B., Deynega G.I., Narsky A.R. New developments of NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in the field of materials for casting processes of superalloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-13-24.
15. Composition for making lost wax models: pat. 2600468 C2 Rus. Federation; appl. 20.03.15; publ. 10.08.16.

Информация об авторах

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

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

Битюцкая Ольга Николаевна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Мокеев Никита Александрович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Tatyana L. Forostovich, Head of production area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey R. Narsky, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga N. Bityutskaya, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita A. Mokeev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.06.2024.

The article was submitted 30.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 03.06.2024.

Научная статья

УДК 669.175

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23

ВЛИЯНИЕ ГОМОГЕНИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ СЛИТКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1163

А.И. Асташкин¹, Д.В. Зайцев¹, А.А. Селиванов¹, Е.А. Ткаченко¹

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

Аннотация. Гомогенизационный отжиг слитков алюминиевых деформируемых сплавов является ключевым процессом для дальнейшей горячей и холодной деформации ввиду повышения однородности структуры и технологической пластичности. Приведены результаты исследования взаимосвязи микроструктуры слитков из сплава 1163 после гомогенизации по различным режимам с параметрами технологической пластичности в интервале температур 350–470 °С. Структурные изменения исследованы с помощью оптической микроскопии, просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1163, система Al–Cu–Mg, гомогенизационный отжиг, микроструктура, фазовый состав слитков, технологическая пластичность

Для цитирования: Асташкин А.И., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и технологическую пластичность слитков из алюминиевого сплава 1163 // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

Scientific article

THE INFLUENCE OF HOMOGENIZATION ANNEALING ON THE STRUCTURAL PHASE EVOLUTION AND TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF ALUMINUM ALLOY 1163 INGOTS

A.I. Astashkin¹, D.V. Zaitsev¹, A.A. Selivanov¹, E.A. Tkachenko¹

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

Abstract. Homogenization annealing of wrought aluminum alloys ingots is crucial for further processes such as hot and cold deformation due to the increasing uniformity of structure and technological plasticity. The paper presents the effects of homogenization parameters under various modes on microstructure evolution and technological plasticity of 1163 alloy (Al–Cu–Mg) ingots in the temperature range of 350–470 °C. The microstructure evolution in 1163 alloy was studied by optical microscopy, transmission electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy.

Keywords: aluminum alloy 1163, Al–Cu–Mg system, homogenization annealing, microstructure, phase composition of ingots, technological plasticity

For citation: Astashkin A.I., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. The influence of homogenization annealing on the structural phase evolution and technological plasticity of aluminum alloy 1163 ingots. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

Введение

Сплав 1163 системы Al–Cu–Mg–Mn является одним из основных конструкционных материалов, применяемых в планере современных самолетов в виде листов, плит, прессованных полуфабрикатов, которые по уровню прочностных и ресурсных характеристик, трещиностойкости и технологичности в сочетании с высокой экономической эффективностью сплава соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам для конструкций перспективных самолетов [1–6]. Однако потенциальные возможности по улучшению комплекса служебных характеристик сплава благодаря применению усовершенствованных технологических процессов на всех этапах цикла изготовления полуфабрикатов еще не исчерпаны.

Гомогенизационный отжиг слитков, полученных методом полунепрерывного литья, является первым этапом в технологическом цикле изготовления деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов [7–10]. Его проводят для устранения в слитках значительной неоднородности структуры и остаточных напряжений, являющихся следствием неравновесной кристаллизации и неравномерного охлаждения, подвергая их длительному высокотемпературному нагреву при температуре ниже температуры солидус [11–13].

Структурные изменения, происходящие в процессе гомогенизационного отжига, оказывают существенное влияние не только на технологическую пластичность слитков при их дальнейшей горячей и холодной деформации, но и на служебные свойства деформированных полуфабрикатов и деталей [7, 11, 13, 14].

При высокотемпературном нагреве слитка протекают два основных процесса [7, 11, 12, 15]:

- гомогенизация за счет растворения в алюминиевом твердом растворе неравновесных первичных структурных составляющих, формирующихся в основном по границам дендритных ячеек и представляющих собой эвтектические фазы, образованные основными легирующими элементами сплава (Cu и Mg – в сплаве 1163);

- гетерогенизация – высокотемпературный распад пересыщенного твердого раствора элементов-антирекристаллизаторов и модификаторов (Mn и Cr) в алюминии с образованием мелкодисперсных вторичных частиц алюминидов переходных металлов, называемых дисперсоидами.

В данной статье приведены результаты исследования влияния температурно-временных параметров гомогенизации слитков из сплава 1163 на их структуру и технологическую пластичность в интервале температур деформации 350–470 °С с целью выбора оптимального режима отжига.

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

Материалы и методы

Материалом для исследований служил плоский слиток сечением 500×2000 мм из сплава 1163, полученный в производственных условиях металлургического завода методом полунепрерывного литья. Химический состав исследованного слитка из сплава 1163, % (по массе):

Al	Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Ni
Основа	4,3	0,5	1,43	0,07	0,03	0,01	0,05	0,01	0,01

Из центральной зоны слитка, отожденного для устранения остаточных литейных напряжений при температуре 400 °С, отобраны темплеты и подвергнуты гомогенизационному отжигу по пяти режимам в интервале температур 350–495 °С при общей продолжительности выдержки от 4 до 36 ч.

Выбор экспериментальных режимов гомогенизации для проведения исследований осуществляли на основе анализа имеющихся в научно-технической литературе данных о структуре, фазовом составе и свойствах алюминиевых сплавов различных систем, фактически применяемых промышленных режимах гомогенизации серийных слитков [3, 4, 6–8, 15–21], а также результатов собственных исследований закономерностей изменения структуры и свойств слитков из алюминиевых сплавов различных систем легирования в широком температурно-временном интервале. Для двухступенчатых режимов гомогенизации температура первой ступени выбрана в области минимальной устойчивости твердого раствора марганца в алюминии. Эффективность режимов оценивали по изменению параметров микроструктуры и свойств слитков при повышенных температурах [13, 14, 22–25].

Микроструктуру гомогенизированных темплетов исследовали на микрошлифах с помощью металлографического микроскопа, оснащенного цифровой камерой.

Исследования тонкой структуры темплетов из слитка проводили методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на фольгах, приготовленных методом электролитической струйной полировки в кислотном-спиртовом электролите, охлажденном до $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Электронно-микроскопические исследования проведены на просвечивающем электронном микроскопе с термополевым катодом Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемку проводили в сканирующем режиме на светопольном детекторе и высокоугловом кольцевом темнопольном детекторе. Анализ химического состава структурных составляющих проводили методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС).

Для изучения параметров технологической пластичности – сопротивления деформации и пластичности при растяжении – определяли механические свойства (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) и допустимую степень деформации (ϵ) при осадке (сжатии) образцов из слитков при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурах горячей деформации ($350\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Образцы отбирали в поперечном направлении (по ширине слитка), испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 с применением универсальной электромеханической машины, оснащенной термокабинетом для проведения испытаний в диапазоне температур от 20 до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты и обсуждение

Гомогенизационный отжиг проводили по пяти различным режимам на темплетах, отобранных от средней части слитков сплава 1163 (см. таблицу). Эффективность режимов оценивали по изменению параметров микроструктуры при комнатной температуре и свойств слитков при повышенных температурах.

Объемная доля неравновесных первичных фаз на границах дендритных ячеек слитка из сплава 1163 после гомогенизации по различным режимам

Условный номер режима	Режим гомогенизации		Объемная доля первичных эвтектических фаз, %
	Характеристика отжига	Продолжительность выдержки, ч	
0	Отжиг для снятия остаточных литейных напряжений при температуре $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	2	7,5
1	Одноступенчатый серийный	12	4,1
2	Одноступенчатый серийный с удвоенным временем выдержки	24	3,8
3	Экспериментальный двухступенчатый с низкотемпературной первой ступенью	36	3,15
4	Экспериментальный двухступенчатый с высокотемпературной первой ступенью	24	4,4
5	Экспериментальный двухступенчатый с высокотемпературной первой ступенью и сокращенной второй ступенью	30	5,0

На рис. 1 представлена микроструктура слитков в литом состоянии (рис. 1, а, б) и после различных режимов гомогенизации (рис. 1, в–м).

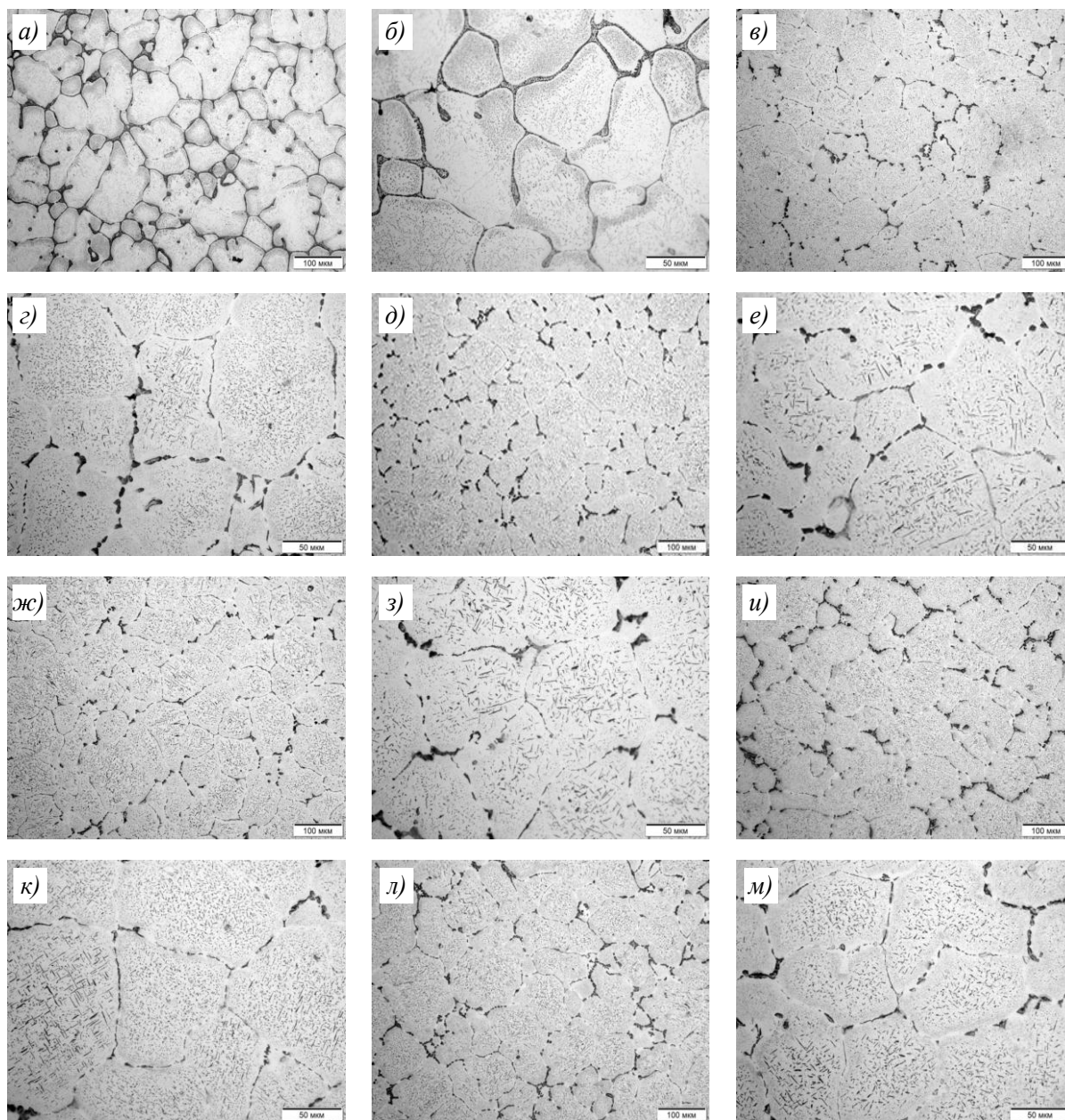


Рис. 1. Микроструктура ($\times 200$ – а, в, д, ж, и, л; $\times 500$ – б, г, е, з, к, м) образцов из слитка сплава 1163 в исходном состоянии и после гомогенизационного отжига по различным режимам: а, б – исходное состояние; в, г – режим 1; д, е – режим 2; ж, з – режим 3; и, к – режим 4; л, м – режим 5

Гомогенизация по всем исследованным режимам приводит к утонению эвтектических прослоек, залегающих по границам зерен, за счет их растворения (рис. 1, в–м). Как показал количественный анализ, объемная доля первичных неравновесных фаз на границах дендритных ячеек слитка в исходном состоянии, составляющая 7,5 %, снижается до 4,1% после гомогенизации по серийному режиму 1 (рис. 1, в, г; см. таблицу). Увеличение продолжительности выдержки (режим 2) приводит к уменьшению

объемной доли избыточных эвтектических фаз до 3,8 % (рис. 1, *д, е*; см. таблицу), что всего на 0,3 % меньше, чем при серийном режиме 1. Это свидетельствует о наиболее полном прохождении диффузионных процессов на начальной стадии гомогенизационного отжига, а также о снижении эффективности процесса гомогенизации при дальнейшем увеличении продолжительности выдержки вследствие уменьшения поверхности контакта между оставшимися частицами фаз и твердым раствором, а также снижением скорости диффузии из-за уменьшения градиента концентрации легирующих элементов по объему дендритов. По результатам исследования установлено, что двухступенчатый режим гомогенизации 3 (с низкотемпературной первой ступенью) обеспечивает более полное растворение эвтектических прослоек и повышает однородность литой структуры. Объемная доля первичных эвтектических фаз снижается до 3,15 % (рис. 1, *ж, з*; см. таблицу). После двухступенчатых режимов гомогенизации 4 и 5 с высокотемпературной первой ступенью объемная доля неравновесных эвтектических фаз на границах зерен составляет 4,4–5,0 % (рис. 1, *и–м*; см. таблицу).

Уменьшение объемной доли избыточных фаз в слитке в результате гомогенизационного отжига по двухступенчатому режиму 3 может положительно повлиять на сокращение продолжительности выдержки при закалке изготавливаемых из них деформированных полуфабрикатов.

На рис. 2 приведены результаты исследований микроструктуры слитков методом ПЭМ на фольгах.

Исследование тонкой структуры слитков из сплава 1163 методом ПЭМ показало, что фазовый состав всех исследованных образцов, помимо α -твердого раствора алюминия, представлен несколькими фазами (рис. 2).

Имеющая форму реек Т-фаза ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$) в исходном состоянии (первичная) длиной ~70 нм (рис. 2, *б*), после гомогенизации (вторичная): 300–700 нм (рис. 2, *г, е, з*). Соотношение размеров поперечного сечения к продольному для реек дисперсных частиц составляет в среднем 1:7–1:10. Состав Т-фазы, определенный методом ЭДС, следующий, % (атомн.): 84,2Al–9,2Mg–6,3Cu–0,3Si, что в близкой степени удовлетворяет стехиометрии $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$. Дифракционный анализ также подтверждает соответствие орторомбической решетке Т-фазы с параметрами $a = 2,42$ нм, $b = 1,25$ нм, $c = 0,775$ нм.

Пластины S-фазы значительно крупнее, чем стержни Т-фазы, и имеют слоистую структуру (рис. 2, *б, в, з*). Пластины S-фазы, лежащие в плоскости фольги, наблюдаются как параллелограммы, что может быть связано с кристаллической структурой и особенностями зарождения частиц (рис. 2, *м*). Состав S-фазы, согласно ЭДС, следующий, % (атомн.): 53Al–27Cu–20Mg, что относительно близко к стехиометрии Al_2CuMg .

После гомогенизации по двухступенчатым режимам можно наблюдать мелкодисперсные пластинчатые выделения, содержащие Cu, которые по морфологии и стехиометрии соответствуют частицам θ' -фазы (Al_2Cu), обозначенной на рис. 2, *з, к*, а также интерметаллиды Al_2Cu и Al–Cu в виде крупных неограниченных частиц с размерами до 5 мкм, располагающихся преимущественно на границах дендритов (рис. 2, *и, л*). Вблизи границ дендритов обнаружены частицы неограниченной формы размером до 500 нм, содержащие Cu, Mn, Fe и Si (рис. 2, *ж*).

Присутствие частиц всех перечисленных фаз вдоль границ дендритов подтверждает карта распределения легирующих элементов в структуре слитка, приведенная на рис. 3.

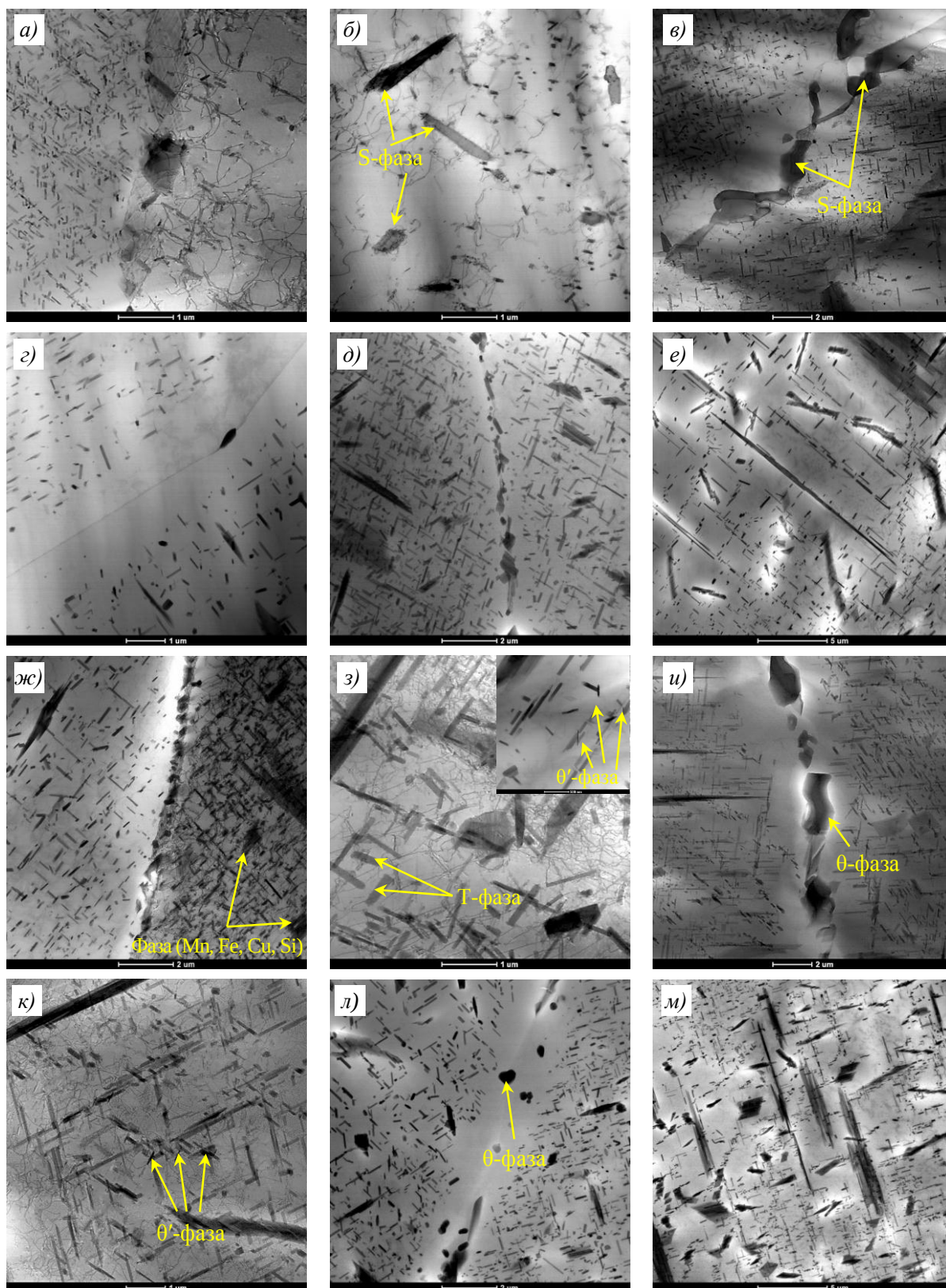


Рис. 2. Микроструктура слитков из сплава 1163 в исходном состоянии и после гомогенизации по различным режимам: а, б – исходное состояние; в, г – режим 1; д, е – режим 2; жс, з – режим 3; и, к – режим 4; л, м – режим 5; выделение фаз на границе (а, в, д, жс, и, л) и в объеме дендритов (б, г, е, з, к, м)

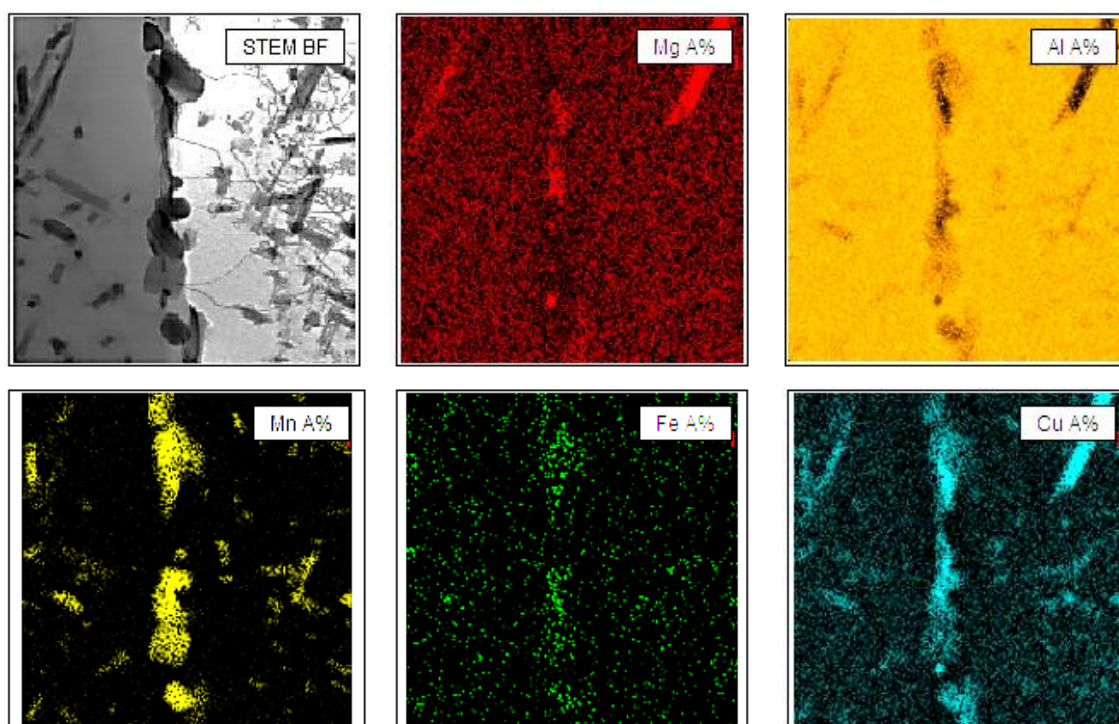


Рис. 3. Карта распределения легирующих элементов в микроструктуре слитка из сплава 1163

Вдоль границ зерен слитков, гомогенизированных по одноступенчатым режимам 1, 2 и по двухступенчатым режимам 4, 5, наблюдается зона, свободная от выделений, шириной 0,5–2,0 мкм (рис. 2, в, г, и, л). После гомогенизации по двухступенчатому режиму 3, зона, свободная от выделений, практически отсутствует (рис. 2, ж).

В результате исследования влияния режимов гомогенизационного отжига на структуру слитков из сплава 1163 установлено, что режимы гомогенизации в основном оказывают влияние на объемную долю частиц неравновесных эвтектик, расположенных по границам дендритных ячеек. Заметных различий по фазовому составу, морфологии и количеству частиц вторичных фаз (дисперсоидов), обнаруженных в теле дендритов слитков, гомогенизированных по исследованным режимам, не обнаружено. Однако при последующих нагревах в процессе горячей деформации слитков и термической обработки полуфабрикатов, могут произойти изменения размеров и количества частиц дисперсоидов, что может существенно повлиять на служебные свойства изделий, особенно на усталостные характеристики и вязкость разрушения [6, 12, 13].

Для исследования влияния режимов гомогенизационного отжига на технологическую пластичность слитков определены сопротивление деформации (σ_b), относительное удлинение (δ) при растяжении и допустимая степень деформации при осадке (ϵ) в интервале температур горячей деформации – от 350 до 470 °C (рис. 4).

При испытаниях на растяжение в интервале температур деформации 350–470 °C образцов из слитков сплава 1163, гомогенизированных по исследованным режимам, видно, что сопротивление деформации всех образцов плавно уменьшается с 60 МПа при температуре 350 °C до 30 МПа при 470 °C (рис. 4, а).

Установлено, что наиболее стабильные и высокие показатели технологической пластичности (от 95 до 105 %) в температурном интервале деформации 400–470 °C обеспечивает гомогенизация по двухступенчатому режиму 3 (рис. 4, б). Следует отметить, что стабильно высокая технологическая пластичность в широком температурном

интервале деформации имеет большое значение при производстве деформированных полуфабрикатов в связи с тем, что в процессе изготовления полуфабрикатов могут происходить значительные колебания температуры литой заготовки за счет ее подстуживания или разогрева в ходе деформации.

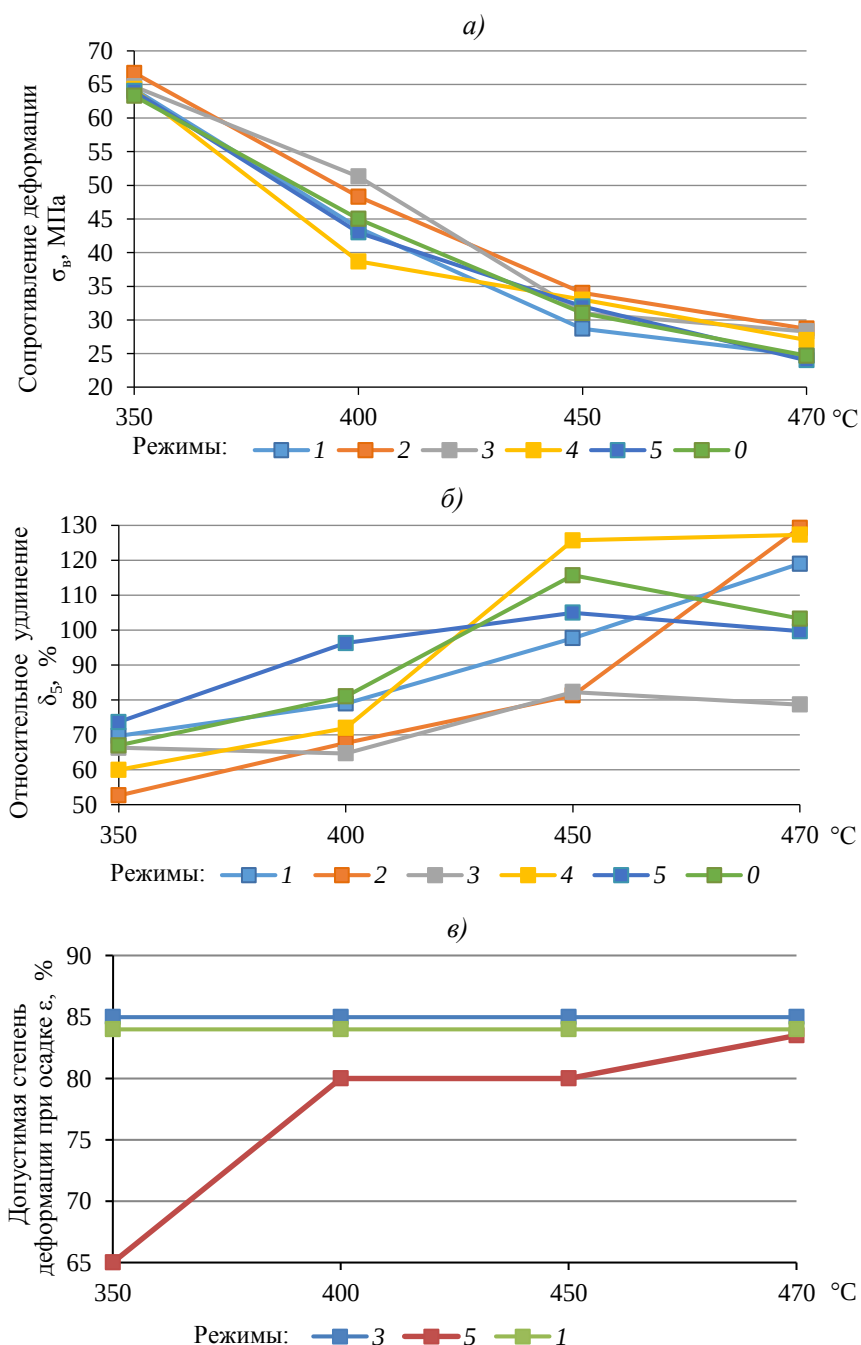


Рис. 4. Параметры технологической пластичности слитков из сплава 1163 при комнатной и повышенных температурах после различных режимов гомогенизации

После гомогенизации по двухступенчатому режиму 5 наблюдается ситуация, схожая с режимом 3 по стабильности параметров технологической пластичности в интервале температур 350–470 °C, однако уровень значений относительного удлинения значительно ниже (65–80 %).

После гомогенизационного отжига слитков по режимам 1, 2 и 4 показатели пластичности при растяжении достигают 80–125 % в интервале температур 450–470 °С, при температурах 350–400 °С пластичность значительно снижается (65–80 %) (рис. 4, б).

При испытании образцов на осадку в интервале температур 350–470 °С получены высокие значения (85 %) допустимой степени деформации после гомогенизации слитков по режимам 1 (серийный) и 3 (двухступенчатый экспериментальный). После гомогенизации по режиму 5 получены более низкие значения допустимой степени деформации 65–83 % (рис. 4, в).

Заключения

Исследовано влияние режимов гомогенизационного отжига на объемную долю избыточных неравновесных эвтектических фаз на границах дендритов, фазовый состав, технологическую пластичность при растяжении и допустимую степень деформации при осадке (сжатии) слитков из сплава 1163.

При исследовании структуры слитка из сплава 1163 методом электронной микроскопии установлено, что после гомогенизации по пяти режимам фазовый состав всех исследованных образцов представлен (помимо α -твердого раствора алюминия) следующими фазами, присутствующими в виде агломератов на границах дендритов или мелкодисперсных выделений, в том числе вторичных, в теле дендритов:

- Т-фаза ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$), имеющая форму реек, в исходном состоянии (первичная) длиной ~70 нм, после гомогенизации (вторичная): 300–700 нм;
- S-фаза (Al_2CuMg), пластины которой значительно крупнее, чем рейки Т-фазы;
- θ' -фаза (Al_2Cu) – в виде мелкодисперсных пластинчатых выделений в теле дендритов или крупных неограниченных частиц с размерами до 5 мкм, располагающихся преимущественно на границах дендритов.

Вблизи границ дендритов обнаружены частицы неограниченной формы размером до 500 нм, содержащие Cu, Mn, Fe и Si.

Существенного различия по фазовому составу, морфологии и количеству частиц нерастворенных фаз в объеме дендритов слитков, гомогенизированных по исследованным режимам, не обнаружено.

Установлено, что наиболее заметное влияние режимы гомогенизационного отжига слитков из сплава 1163 оказывают на объемную долю частиц неравновесных эвтектик, расположенных по границам дендритных ячеек, которая снижается с 7,5 % в слитке до гомогенизации до 3,15–5,0 % после гомогенизации по режимам 1–5.

Показано, что интенсивность протекания диффузионных процессов растворения неравновесных эвтектических прослоек на границах дендритов снижается по мере увеличения продолжительности выдержки при температуре гомогенизации, поскольку уменьшается поверхность контакта между оставшимися частицами фаз и твердым раствором и снижается скорость диффузии вследствие уменьшения градиента концентрации по объему дендритов.

Определены механические свойства при растяжении и осадке образцов из слитков, гомогенизированных по различным режимам, в интервале температур от 350 до 470 °С. Для образцов, гомогенизированных по режиму 3, обеспечивающему наилучшую растворимость интерметаллидных фаз, достигаются максимальные значения характеристик пластичности ($\delta = 95$ –105 %). При этом допустимая степень деформации за один нагрев составляет 85 %, что дает возможность рекомендовать указанный режим гомогенизационного отжига для опробования в серийном производстве промышленных полуфабрикатов из сплава 1163 и деформации в этом интервале температур.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Нечайкина Т.А., Сомов А.В., Иванов А.Л., Мурзабаева О.Ю. Влияние термической обработки на структуру и свойства прессованных полуфабрикатов из перспективного сверхпрочного алюминиевого сплава В-1977 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2023. № 1 (811). С. 28–33.
4. Нефедова Ю.Н., Шляпникова Т.А., Иванов А.Л., Сидельников В.В. Методы снижения остаточных напряжений при закалке высокопрочных алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-23-33.
5. Овсянников Б.В., Замятин В.М., Разинкин А.В., Мушников В.С. Влияние скорости литья на процесс кристаллизации и структуру крупногабаритного плоского слитка из сплава 1163 // Технология легких сплавов. 2020. № 1. С. 169–173.
6. Цукров С.Л., Исякаев К.Т. О результатах закалки листов из сплава 1163 на линии непрерывной термообработки // Технология легких сплавов. 2020. № 1. С. 35–38.
7. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1978. 392 с.
8. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: МИСИС, 2010. 511 с.
9. Фридляндер И.Н. Металловедение алюминиевых сплавов. М.: Наука, 1985. 238 с.
10. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
11. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Цуканов С.Л. Термическая обработка деформируемых алюминиевых сплавов. М.: АПРАЛ, 2020. 552 с.
12. Замятин В.М., Грачев С.В., Гриненко М.А. и др. Рациональное легирование и модифицирование алюминиевых сплавов на основе систем Al–Cu–Mg–Mn и Al–Zn–Mg–Cu // Нефть и газ. 2011. № 3. С. 106–112.
13. Ткаченко Е.А., Латушкина Л.В. Влияние режимов гомогенизации на структуру и свойства слитков и прессовано-штампованных полуфабрикатов из сплава 1933 // Технология легких сплавов. 2003. № 4. С. 34–38.
14. Асташкин А.И., Бабанов В.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Структура и свойства массивных поковок с пониженным уровнем остаточных напряжений из алюминиевого сплава 1933сб сбалансированного состава // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-13-21.
15. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Лукина Е.А., Селиванов А.А. Влияние гомогенизационного отжига на структуру и свойства слитков из сплава 1933 системы Al–Zn–Mg–Cu // Труды ВИАМ. 2015. № 11. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 28.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-1-1.
16. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
17. Xiao Y.L., Qing L.P., Xi F. et al. Microstructural evolution of Al–Cu–Mg–Ag alloy during homogenization // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 484. P. 790–794.
18. Huang T., Qin Y., Chao D. et al. Study on homogenization process of large size Al–Cu–Mg–Mn alloy ingot // Materials reports. 2020. Vol. 24. Is. Z1. P. 325–327.
19. Lin H., Zhu K., Liu Q. et al. Microstructural characterization of the as-cast and homogenized Al–Cu–Mg–Ag alloy // Materials. 2023. Vol. 16. Is. 1. P. 433–441.

20. Liu Q., Li X., Li Z. et al. Effect of Cu content on microstructures of as-cast and homogenized Al–Cu–Mg–Ag alloys // *Key engineering materials*. 2022. Vol. 921. P. 59–64.
21. Jian Wang, Yalin Lu, Dongshuai Zhou et al. Influence of homogenization on microstructural response and mechanical property of Al–Cu–Mn alloy // *Materials (Basel)*. 2018. Vol. 11. Is. 6. P. 914–921.
22. Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства слитков из алюминий-литиевого сплава 1441 // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
23. Оглодков М.С., Романенко В.А., Бенариев И., Рудченко А.С., Григорьев М.В. Исследование промышленных полуфабрикатов из перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
24. Liu X.Y., Pan Q.L., Fan X. et al. Microstructural evolution of Al–Cu–Mg–Ag alloy during homogenization // *Journal Alloys Compounds*. 2009. Vol. 484. P. 790–794.
25. Li H.Z., Ou Y.J., Liao H.J. et al. Microstructural evolution of high purity Al–Cu–Mg alloy during homogenization // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 788. P. 208–214.

References

1. Kablov E.N. Modern materials are the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
2. 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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kablov E.N., Nechaikina T.A., Somov A.V., Ivanov A.L., Murzabaeva O.Yu. The influence of heat treatment on the structure and properties of pressed semi-finished products from the promising super-strong aluminum alloy V-1977. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2023, no. 1 (811), pp. 28–33.
4. Nefedova Yu.N., Shlyapnikova T.A., Ivanov A.L., Sedelnikov V.V. Methods for reducing residual stresses during hardening of high-strength aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-23-33.
5. Ovsyannikov B.V., Zamyatin V.M., Razinkin A.V., Mushnikov V.S. The influence of casting speed on the crystallization process and the structure of a large flat ingot of alloy 1163. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2020, no. 1, pp. 169–173.
6. Tsukrov S.L., Isyakaev K.T. On the results of hardening sheets of alloy 1163 on a continuous heat treatment line. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2020, no. 1, pp. 35–38.
7. Novikov I.I. *Theory of heat treatment of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 392 p.
8. Belov N.A. *Phase composition of industrial and advanced aluminum alloys*. Moscow: MISIS, 2010, 511 p.
9. Fridlyander I.N. *Metallurgy of aluminum alloys*. Moscow: Nauka, 1985, 238 p.
10. Oglodkov M.S., Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Panteleev M.D. Directions of the development of promising aluminum-lithium alloys for aero-space engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
11. Kolobnev N.I., Ber L.B., Tsukanov S.L. *Heat treatment of deformable aluminum alloys*. Moscow: APRAL, 2020, 552 p.
12. Zamyatin V.M., Grachev S.V., Grinenko M.A. et al. Rational alloying and modification of aluminum alloys based on the Al–Cu–Mg–Mn and Al–Zn–Mg–Cu systems. *Neft i gaz*, 2011, no. 3, pp. 106–112.
13. Tkachenko E.A., Latushkina L.V. The influence of homogenization modes on the structure and properties of ingots and pressed-stamped semi-finished products from alloy 1933. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2003, no. 4, pp. 34–38.

14. Astashkin A.I., Babanov V.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. Structure and properties of massive forgings with a reduced level of residual stresses made of aluminum alloy 1933sb of balanced composition. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-13-21.
15. Vakhromov R.O., Tkachenko E.A., Lukina E.A., Selivanov A.A. Influence of homogenization annealing on structure and properties of ingots from 1933 alloy of Al–Zn–Mg–Cu system. *Trudy VIAM*, 2015, no. 11, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 28, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-1-1.
16. Fridlyander I.N. *Aluminum wrought structural alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p.
17. Xiao Y.L., Qing L.P., Xi F. et al. Microstructural evolution of Al–Cu–Mg–Ag alloy during homogenization. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 484, pp. 790–794.
18. Huang T., Qin Y., Chao D. et al. Study on homogenization process of large size Al–Cu–Mg–Mn alloy ingot. *Materials reports*, 2020, vol. 24, is. Z1, pp. 325–327.
19. Lin H., Zhu K., Liu Q. et al. Microstructural characterization of the as-cast and homogenized Al–Cu–Mg–Ag alloy. *Materials*, 2023, vol. 16, is. 1, pp. 433–441.
20. Liu Q., Li X., Li Z. et al. Effect of Cu content on microstructures of as-cast and homogenized Al–Cu–Mg–Ag alloys. *Key engineering materials*, 2022, vol. 921, pp. 59–64.
21. Jian Wang, Yalin Lu, Dongshuai Zhou et al. Influence of homogenization on microstructural response and mechanical property of Al–Cu–Mn alloy. *Materials* (Basel), 2018, vol. 11, is. 6, pp. 914–921.
22. Antipov V.V., Tkachenko E.A., Zajtsev D.V., Selivanov A.A., Ovsyannikov B.V. The influence of homogenizing annealing regimes on the structural phase state and mechanical properties of aluminum-lithium alloy 1441 ingots. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 18, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
23. Oglokov M.S., Romanenko V.A., Benarieb I., Rudchenko A.S., Grigoryev M.V. Study of industrial semi-finished products from advanced aluminum-lithium alloys for aircraft products. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
24. Liu X.Y., Pan Q.L., Fan X. et al. Microstructural evolution of Al–Cu–Mg–Ag alloy during homogenization. *Journal Alloys Compounds*, 2009, vol. 484, pp. 790–794.
25. Li H.Z., Ou Y.J., Liao H.J. et al. Microstructural evolution of high purity Al–Cu–Mg alloy during homogenization. *Materials Science Forum*, 2014, vol. 788, pp. 208–214.

Информация об авторах

Асташкин Александр Игоревич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зайцев Денис Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Селиванов Андрей Аркадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткаченко Евгения Анатольевна, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander I. Astashkin, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Zaitsev, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Evgenia A. Tkachenko, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.06.2024.
The article was submitted 30.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.06.2024.

Научная статья

УДК 621.7.043

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ШТАМПОВОК ИЗ СПЛАВА ВТ6ч ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С НАГРЕВОМ В β -ОБЛАСТЬ

В.А. Крохина¹, А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследования механических свойств и микроструктуры штамповок из сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом в β -область в зависимости от скорости охлаждения с температуры β -области, температуры второй ступени термической обработки, а также геометрических параметров штамповок. Приведены значения механических свойств при растяжении, ударной вязкости, вязкости разрушения и микроструктура штамповок, а также малоцикловая усталость и предел выносливости для сравнения свойств. Проведен сравнительный анализ полученных результатов испытаний.

Ключевые слова: штамповки из титанового сплава ВТ6ч, режимы термической обработки с нагревом в β -область, механические свойства, вязкость разрушения, микроструктура

Для цитирования: Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В. Исследование механических свойств и структуры штамповок из сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом в β -область // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF FORGINGS MADE OF VT6ch ALLOY AFTER HEAT TREATMENT WITH HEATING IN THE β -AREA

V.A. Krokhina¹, A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹

¹Federal 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 a study of the mechanical properties and microstructure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the β -area, depending on the cooling rate from the temperature of the β -area, the temperature of the second stage of heat treatment, as well as the geometric parameters of the forgings. The values of mechanical properties under tension, impact strength, fracture toughness, microstructure of forgings, as well as low-cycle fatigue and endurance limit in terms of comparing properties are given. A comparative analysis of the obtained test results was carried out.

Keywords: forgings of titanium alloy VT6ch, modes of heat treatment with heating in the β -area, mechanical properties, fracture toughness, microstructure

For citation: Krokhina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V. Investigation of the mechanical properties and structure of forgings made of VT6ch alloy after heat treatment with heating in the β -area. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-24-33.

Введение

Наиболее широкое применение в российской авиации получил титановый сплав $(\alpha + \beta)$ -класса средней прочности ВТ6ч, а в зарубежной – его аналог сплав Ti-6-4. Из сплава ВТ6ч изготавливают большое количество деталей и элементов изделий авиационной техники – например, силовые сварные и монолитные детали и узлы планера и шасси в гражданском среднемагистральном узкофюзеляжном самолете Сухой Суперджет (SSJ-100), а также в конструкциях самолета МС-21 и изделиях как гражданского, так и военного назначения ПАО «Туполев» [1–8].

Увеличение значений вязкости разрушения, как неотъемлемой характеристики трещиностойкости, является одной из основных задач современных разработок [5–9]. В работе [2] показано, что, несмотря на высокие значения вязкости разрушения, заключительная деформация в β -области применяется лишь в тех случаях, когда необходимо выполнение требований по геометрическим параметрам крупногабаритных полуфабрикатов, а возможность изготовления данных полуфабрикатов с применением традиционных схем – с деформацией в $(\alpha + \beta)$ -области – отсутствует. В свою очередь, за рубежом для полуфабрикатов из сплава Ti-6-4 толщиной до 110 мм находит применение отжиг с нагревом при температурах β -области (β -отжиг) [3, 4].

Как известно, после проведения процесса термической обработки образуется микроструктура с крупным размером β -зерна и большей текстурированностью внутризеренных пластин α -фазы, поэтому вязкость разрушения увеличивается сильнее в сравнении с деформацией в β -области на заключительной стадии. Считается, что пластинчатые структуры обеспечивают высокие значения вязкости разрушения, сопротивления развитию трещин, характеристик жаропрочности при низких значениях прочности, пластичности и сопротивления усталости [10–15]. Однако проведенные ранее исследования [2] крупногабаритных полуфабрикатов из сплава ВТ6ч (поковки штампованные (штамповки) и кованые, профили), полученных по различным технологическим схемам, показали, что пластинчатая структура, формируемая при заключительной деформации в β -области, может обеспечить уровень механических свойств, сопоставимый с уровнем свойств полуфабрикатов с глобулярной структурой, полученной при заключительной деформации в $(\alpha + \beta)$ -области, а также более высокие значения вязкости разрушения.

Согласно данным работы [10], вязкость разрушения титановых сплавов с пластинчатой структурой возрастает с увеличением диаметра первичных β -зерен, размеров α -колоний и толщины α -пластин, что связывают с более частым и резким изменением направления движения магистральной трещины и, соответственно, снижением скорости ее распространения.

Учитывая тот факт, что исследования, проведенные в последние годы [1–3], в некоторых выводах не совпадают с полученными ранее данными, что связано с применением нового, более современного оборудования и внесением корректировок в параметры технологических процессов при изготовлении полуфабрикатов, актуальной остается задача по исследованию процесса термической обработки с нагревом в β -область.

В данной статье приведены результаты определения (и их сравнение) механических свойств и микроструктуры штамповок из титанового сплава ВТ6ч после процесса термической обработки с нагревом в β -область в зависимости от скорости охлаждения, температуры второй ступени, а также геометрических параметров исследуемых полуфабрикатов.

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

Материалы и методы

Для проведения исследований использованы штамповки из титанового сплава ВТ6ч, изготовленные на опытно-промышленном производстве. Данные штамповки изготовлены с заключительной деформацией в $(\alpha + \beta)$ -области.

Для исследования влияния скорости охлаждения на формирование β -структуры подобраны экспериментальные режимы термической обработки титанового сплава ВТ6ч, включающие нагрев при температуре β -области на первой ступени термической обработки $((T_{п.п} + 30)^\circ\text{C})$, где $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения) и различные скорости охлаждения с температуры β -области $(750 \pm 5^\circ\text{C})$ с последующим охлаждением на воздухе (режим 1), под вентилятором (режим 2) и медленным охлаждением с печью (режим 3).

Для исследования влияния температуры второй ступени термической обработки на свойства и микроструктуру штамповок выбраны режимы и проведена термическая обработка при нагреве и выдержке при температуре $(T_{п.п} + 30)^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе и выдержка при температурах $700 \pm 5^\circ\text{C}$ (режим 4), $650 \pm 5^\circ\text{C}$ (режим 5) и $600 \pm 5^\circ\text{C}$ (режим 6) с охлаждением на воздухе.

Для исследования влияния массогабаритных параметров на структуру и свойства штамповок проведена термическая обработка по режиму 4 на двух различных штамповках: массой 180 кг, а также массой 355 кг.

Испытания образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч на растяжение проводили согласно требованиям ГОСТ 1497–84, на ударную вязкость – по ГОСТ 9754–2020, на вязкость разрушения – по ГОСТ 25.506–85. Исследования микроструктуры выполняли на подготовленных травленых микрошлифах на оптическом металлографическом микроскопе.

Испытания на малоцикловую усталость проводили на двух различных типах образцов: полосе с отверстием и проушине, согласно требованиям ГОСТ 25.502–79. Для образцов типа «Полоса с отверстием» выбран теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,6$, для образцов типа «Проушина» – $\alpha_\sigma = 3,2$; коэффициент асимметрии $R_\sigma = 0,1$ и частота $\nu = 5$ Гц.

Испытания на многоцикловую усталость проводили на двух различных типах образцов: на гладких образцах и на образцах с надрезом при изгибе с вращением, согласно требованиям ГОСТ 25.502–79; коэффициент асимметрии $R = -1$, частота $\nu = 50$ Гц, цикл нагружения синусоидальный.

Результаты и обсуждения

В табл. 1 представлены результаты проведенных испытаний (средние значения) на растяжение, ударную вязкость и вязкость разрушения образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после трех режимов термической обработки с различными скоростями охлаждения с температуры β -области. На рис. 1 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

Таблица 1

**Свойства образцов от штамповок из сплава ВТ6ч
после различных режимов термической обработки (средние значения)**

Условный номер режима	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Модуль упругости, ГПа	δ , %	ψ , %	K_{CU} , кДж/м ²	K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$
1	920	843	117	7,5	16,5	530	100
2	850	783	120	10,0	24,0	557	83
3	840	783	119	9,1	18,5	610	75

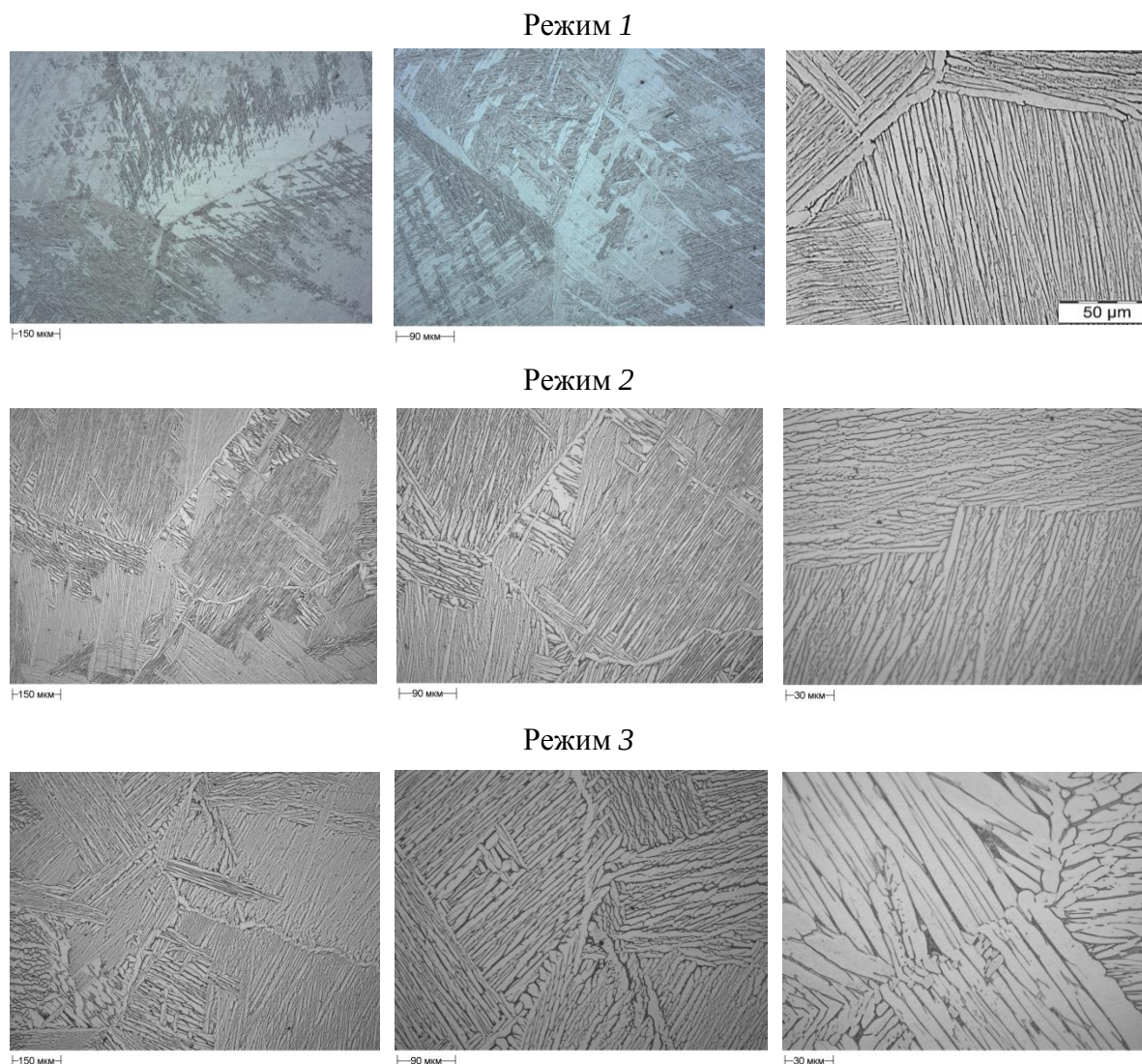


Рис. 1. Микроструктура образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после трех режимов термической обработки с нагревом в β -область (поперечное сечение)

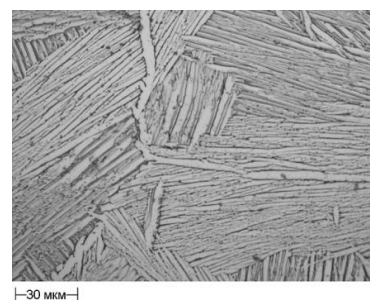
Микроструктура исследованных образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч представлена крупными β -зернами и разориентированными колониями α -пластин внутри них, отличающихся по размеру α -пластин в зависимости от скорости охлаждения с температуры β -области (с увеличением скорости охлаждения размер уменьшается). С уменьшением размера α -пластин (режим 1) увеличивается прочность при растяжении с сохранением уровня характеристик пластичности. При этом показатели вязкости разрушения после режима 1 значительно превышают значения, полученные после медленного охлаждения с температуры β -области. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что наилучшие свойства штамповки обеспечиваются после режима с охлаждением на воздухе. Поэтому дальнейшие исследования проводили с охлаждением из β -области на воздухе.

В табл. 2 представлены результаты испытаний на определение свойств образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с различной температурой второй ступени. На рис. 2 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

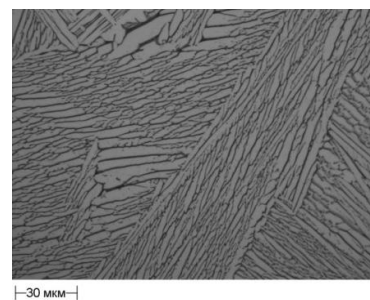
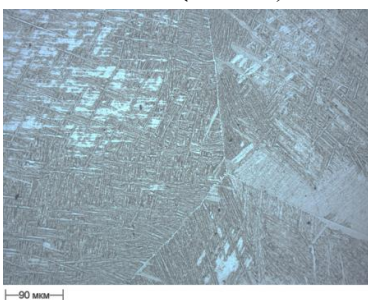
**Свойства образцов от штамповок из сплава ВТ6ч
после режимов термической обработки с нагревом в β -область
с различной температурой второй ступени (средние значения)**

Условный номер режима	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Модуль упругости, ГПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	K _{1с} , МПа√м
1	920	843	117	7,5	16,5	530	100
4	930	860	119	8,0	12,0	530	99
5	940	860	119	8,2	14,5	570	98
6	890	830	119	7,4	16,2	735	128

Режим 4 (700 °С)



Режим 5 (650 °С)



Режим 6 (600 °С)

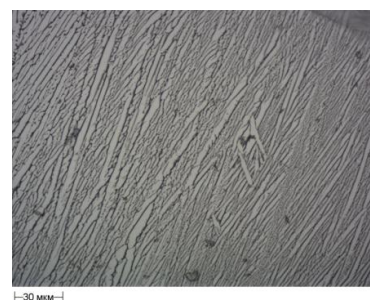
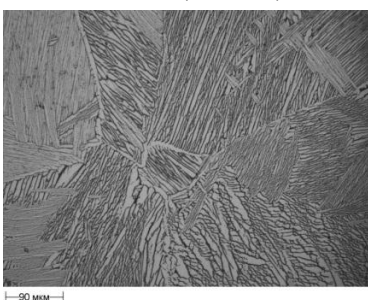


Рис. 2. Микроструктура образцов от штамповок из сплава ВТ6ч после режимов термической обработки с нагревом в β -область с различной температурой второй ступени (поперечное сечение)

Для наглядности в табл. 2 также представлены результаты испытаний после нагрева до 750 °С. Результаты испытаний показывают, что снижение температуры второй ступени термической обработки до 600 °С приводит к уменьшению прочности и значительному увеличению характеристик ударной вязкости и вязкости разрушения.

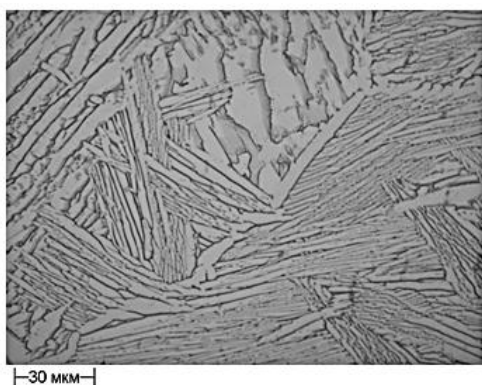
С увеличением температуры второй ступени увеличивается толщина α -пластин и средний размер β -зерен. Ориентировка α -пластин в зависимости от режима термической обработки не отличается.

В табл. 3 представлены результаты испытаний на определение свойств образцов от различных типов штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом при температуре β -области. На рис. 3 приведены изображения микроструктуры образцов от штамповок.

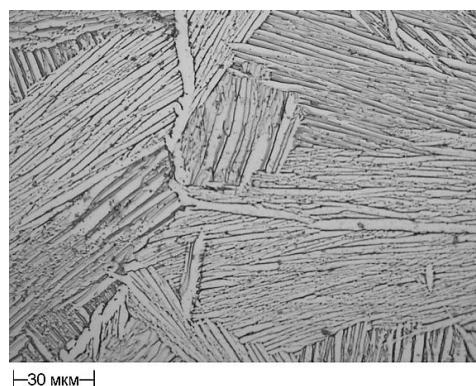
Таблица 3

**Свойства образцов от различных типов штамповок из сплава ВТ6ч
после режимов термической обработки с нагревом в β -область (средние значения)**

Масса штамповки, кг, полученной по режиму 4	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	K _{1с} , МПа√м
180	896	795	9,6	18,3	617	118
355	853	793	11,5	21,0	655	130



Штамповка массой 180 кг



Штамповка массой 355 кг

Рис. 3. Микроструктура образцов от различных типов штамповок из сплава ВТ6ч после режимов термической обработки с нагревом в β -область (поперечное сечение)

Полученные результаты исследований влияния скорости охлаждения с температур β -области подтверждают тот факт, что титановый сплав ВТ6ч крайне чувствителен к скоростям охлаждения с температур β -области аналогично сплаву ВТ6 [13–15]. Медленное охлаждение приводит к образованию более широких пластин α -фазы, в результате чего уменьшаются значения вязкости разрушения и прочности. Таким образом, можно предположить, что для получения высоких значений вязкости разрушения при формировании β -структуры в процессе термической обработки необходимо формирование тонких пластин α -фазы.

Исследование влияния температуры второй ступени термической обработки с нагревом при температуре β -области показало, что повышение температуры приводит к росту толщины пластин α -фазы, за счет чего уменьшается вязкость разрушения. Аналогично стандартному режиму отжига, повышение температуры приводит к увеличению предела прочности. Следует отметить, что начиная с температуры 650 и до 750 °С разница в значениях предела прочности, пластичности, ударной вязкости и вязкости разрушения – незначительная.

Для исследования влияния массогабаритных параметров на формирование структуры и механические свойства штамповок после термической обработки с нагревом в β -область выбран режим 4, который обеспечил средние показатели по

всем исследуемым механическим свойствам. Следует отметить, что на штамповке массой 355 кг суммарная степень деформации была больше, за счет чего сформировалось более мелкое зерно в сравнении со штамповкой массой 180 кг. Результаты испытаний показали, что на крупногабаритной штамповке (массой 355 кг) получены более высокие значения вязкости разрушения, что может быть связано с размером зерна, который тем больше, чем меньше степень деформации. Разница в полученных значениях вязкости разрушения, прочности и пластичности, приведенных в табл. 2 и 3, также может быть связана с различной предшествующей деформацией.

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать вывод, что на показатели вязкости разрушения при процессе термической обработки с нагревом при температуре β -области влияет как размер β -зерна и α -пластин, так и исходная структура полуфабриката из титанового сплава ВТ6ч.

Благодаря проведенным исследованиям, можно утверждать, что термическая обработка с нагревом при температуре β -области является применимой для полуфабрикатов из сплава ВТ6ч, где необходимо обеспечение высоких значений вязкости разрушения с сохранением прочностных характеристик. Для сравнения рассмотрим полученные значения со значениями штамповки, изготовленной по стандартной технологии: заключительная деформация в $(\alpha + \beta)$ -области и последующий отжиг, а также со значениями для штамповки с заключительной деформацией в β -области и последующим отжигом в $(\alpha + \beta)$ -области, при которой образуется структура, обеспечивающая высокие значения вязкости разрушения [2]. В табл. 4 представлены сравнительные результаты испытаний штамповок, полученных по различным технологическим режимам [2].

Таблица 4

**Механические свойства образцов от штамповок
из сплава ВТ6ч (средние значения)**

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²	K _{1с} , МПа $\sqrt{м}$
В $(\alpha + \beta)$ -области + отжиг в $(\alpha + \beta)$ -области	922	847	9,0	16,2	520	95
В β -области + отжиг в $(\alpha + \beta)$ -области	941	901	8,3	19,2	520	120
В $(\alpha + \beta)$ -области + отжиг с нагревом в β -область	853	793	11,5	21,0	655	130

Видно, что после термической обработки с нагревом при температуре β -области существенно снижаются значения прочности при растяжении. Однако высокие значения вязкости разрушения и ударной вязкости показывают преимущество применения данного метода.

Как упоминалось ранее в статьях [2, 6, 16–20], большой интерес представляют усталостные свойства, характеризующие способность материала полуфабрикатов сопротивляться усталостному разрушению. В табл. 5 и 6 представлены результаты испытаний на малоцикловую и многоцикловую усталость образцов от штамповок из титанового сплава ВТ6ч после термической обработки с нагревом при температуре β -области. Результаты испытаний штамповки с заключительной деформацией в β -области для сравнения результатов взяты из статьи [2].

Полученные значения малоциклового усталости показывают, что после термической обработки с нагревом при температуре β -области материал более чувствителен к концентратору типа «Полоса с отверстием», чем типа «Проушина». Число циклов до разрушения незначительно меньше по сравнению с традиционной технологией изготовления штамповок. Значения предела выносливости находятся на одном уровне.

Таблица 5

**Результаты испытаний на малоциковую усталость образцов от штамповок
из сплава ВТ6ч (средние значения)**

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	Напряжение $\sigma_{\text{нетто}}$, МПа	Число циклов до разрушения $N_{\text{разр}}$
Образцы типа «Полоса с отверстием» ($K_t = 2,6$)		
В β -области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	274,4	174 030
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг с нагревом в β -область		128 780
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области		215 530
Образцы типа «Проушина» ($K_t = 3,2$)		
В β -области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	196	175 885
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг с нагревом в β -область		155 650
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области		324 500

Таблица 6

Средние значения предела выносливости образцов от штамповок из сплава ВТ6ч

Вид полуфабриката – штамповка с заключительной деформацией	Предел выносливости на базе $N = 10^7$ циклов
На гладких образцах	
В β -области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	470
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг с нагревом в β -область	450
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	390
На образцах с надрезом (теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 2,33$)	
В β -области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	180
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг с нагревом в β -область	160
В ($\alpha + \beta$)-области + отжиг в ($\alpha + \beta$)-области	180

Заключения

Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе термической обработки с нагревом при температуре β -области с целью обеспечения высоких значений вязкости разрушения необходима структура с первичными зёрнами β -фазы и тонкими пластинами α -фазы в виде переплетающихся колоний. Полученные данные противоречат выводам, сделанным в работе [10], о том, что вязкость разрушения сплавов с пластинчатой структурой увеличивается с ростом диаметра первичных β -зёрен, толщины α -пластин и размеров α -колоний. Для титанового сплава ВТ6ч рост пластин α -фазы и β -зёрен приводит к снижению вязкости разрушения. Однако в зависимости от требуемых механических свойств штамповки необходим тщательный подбор режима в зависимости от исходной структуры и степени деформации.

Список источников

1. Арисланов А.А., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из сплава ВТ6ч. // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
2. 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.
3. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Osaka: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2014. P. 22–27.
4. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K., Motyka M. Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys // Titanium Alloys-Advances in Properties Control. London: InTech, 2013. P. 69–80.

5. Братухин А.Г., Колачев Б.А., Садков В.В. и др. Технология производства титановых самолетных конструкций. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
6. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. научно-информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
7. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
8. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications // Advanced Engineering Materials. 2003. No. 5. P. 419–427. DOI: 10.1002/adem.2003-06-26.
9. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
10. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИАМ–МАТИ, 2009. 520 с.
11. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.
12. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ. 2013. № 2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2024).
13. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
14. Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А., Ливанов В.А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия. 1980. 464 с.
15. 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: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
16. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава BT22M, изготовленных с заключительной деформацией в ($\alpha+\beta$)- и β -областях // Титан. 2021. № 1 (70). С. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
17. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава BT6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 02. URL: <http://journal.viam.ru>. (дата обращения: 13.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
18. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Особенности структурно-фазового состава и механических свойств псевдо- β -титанового сплава BT47, легированного добавками кремния // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 04. URL: <http://journal.viam.ru>. (дата обращения: 14.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
19. Мыльников В.В., Кондрашкин О.Б., Шетулов Д.И. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. С. 177.
20. Sauer C., Luetjering G. Thermo-mechanical processing of high strength-titanium alloys and effects on microstructure and properties // Journal of Materials Processing Technology. 2001. No. 117 (3). P. 311–317. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00788-9.

References

1. Arislanov A.A., Putyrskiy S.B., Yakovlev A.L., Gribkov M.S. Analysis of microstructure and mechanical properties of welded joint from VT6ch. alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-74-79.
2. 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.
3. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. *Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry*. Osaka: Nippon Steel & Sumitomo Metal, 2014, pp. 22–27.
4. Sieniawski J., Ziaja W., Kubiak K., Motyka M. Microstructure and mechanical properties of high strength two-phase titanium alloys. *Titanium Alloys-Advances in Properties Control*. London: InTech, 2013, pp. 69–80.
5. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. et al. *Technology for the production of titanium aircraft structures*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1995, 448 p.

6. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia*: collection of scientific information materials. 3rd ed., revised and additional. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
7. Kablov E.N. What will the future be made of? New generation materials, technologies for their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
8. Peters M., Kumpfert J., Ward C.H., Leyens C. Titanium Alloys for Aerospace Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2003, no. 5, pp. 419–427. DOI: 10.1002/adem.2003-06-26.
9. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha+\beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
10. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: reference book. Moscow: VILS–MATI, 2009, 520 p.
11. Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation equipment and other industries. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7–8, pp. 47–54.
12. Horev A.I. Fundamental and applied works on structural titanium alloys and perspective directions of their development. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2024).
13. Glazunov S.G., Moiseev V.N. *Structural titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
14. Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Livanov V.A. *Titanium alloys. Metallography of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 464 p.
15. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
16. Kablov E.N., Putyrsky S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of resistance to fatigue fracture of forgings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the ($\alpha+\beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, no. 1 (70), pp. 473–479. DOI: 10.1007/s11041-015-9907-1.
17. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
18. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A. Features of the structural and phase composition, mechanical properties of metastable β -titanium alloy VT47 alloyed with silicon. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
19. Mylnikov V.V., Kondrashkin O.B., Shetulov D.I. *Cyclic strength and durability of structural materials*. N. Novgorod: NNGASU, 2018, p. 177.
20. Sauer C., Luetjering G. Thermo-mechanical processing of high strength-titanium alloys and effects on microstructure and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, no. 117 (3), pp. 311–317. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00788-9.

Информация об авторах

Крохина Виктория Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Арисланов Аскаджон Абдурасулович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Путырский Станислав Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Victoria A. Krokhina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Askadzhon A. Arislanov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav V. Putyrskiy, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.06.2024.
The article was submitted 06.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.06.2024.

Научная статья

УДК 620.193.21

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ГИБРИДНЫХ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И АРАМИДНОГО ОРГАНОПЛАСТИКА

Г.Ф. Железина¹, Г.С. Кулагина¹, А.Ч. Кан¹, В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Исследована климатическая стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов класса «алюминий–органоупластик» в различных природно-климатических и лабораторных условиях (теплый влажный и морской климат, камера солевого тумана и др.). Установлено, что при экспозиции листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н в теплом влажном климате не наблюдается снижения упруго-прочностных свойств образцов. При экспозиции образцов шириной 10 мм с незащищенными торцами уровень сохранения прочности при растяжении составляет 82–94 %.

Ключевые слова: металлополимерные композиты, сплавы, арамидный органоупластик, климатическая стойкость, влагопоглощение

Для цитирования: Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Кан А.Ч., Старцев В.О. Исследование климатической стойкости гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органоупластика // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.

Scientific article

RESEARCH OF THE CLIMATE STABILITY OF HYBRID LAYERED METAL POLYMER MATERIALS BASED ON ALUMINIUM AND ARAMID ORGANOPLASTICS

G.F. Zhelezina¹, G.S. Kulagina¹, A.Ch. Kan¹, V.O. Startsev¹

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

Abstract. Climatic stability of hybrid layered metal polymer materials of the «aluminum–organoplastics» class in different climatic and laboratory conditions (warm humid climate, sea climate, salt spray chamber, etc.) is investigated. It is established that properties of materials Alor D16/41 (sheet) and Alor D16/41H (sheet) exposed in warm humid climate does not show reducing the elastic-strength properties of the samples. When exposed to narrow samples with a width of 10 mm with unprotected ends the level of preservation of tensile strength is 82–94 % from the initial value.

Keywords: layered metal polymer composite material, alloys, aramid organoplastics, climate stability, moisture absorption

For citation: Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Kan A.Ch., Startsev V.O. Research of the climate stability of hybrid layered metal polymer materials based on aluminium and aramid organoplastics. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-34-44.

Введение

Обеспечение надежной работы элементов конструкций при эксплуатации в различных природно-климатических условиях – одно из основных требований, предъявляемых к современным материалам авиационного назначения. Это особенно важно для материалов внешнего контура летательных аппаратов, постоянно подвергающихся воздействию внешней среды: нагреву, охлаждению, атмосферным осадкам, солнечной радиации и т. д. [1, 2].

Для внешних обшивок планера и оперения самолетов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан новый класс конструкционных материалов – гибридные слоистые металлополимерные композиты. Разработаны слоистые материалы класса АЛОП, состоящие из тонких листов алюминиевого сплава и слоев высокопрочного органопластика на основе арамидных волокон [3], а также слоистые материалы класса СИАЛ, состоящие из листов алюминиевого сплава и слоев стеклопластика [4–7].

Материалы АЛОП и СИАЛ по уровню свойств не уступают зарубежным аналогам – слоистым композитам ARALL и GLAR на основе алюминиевых сплавов в сочетании с органопластиком и стеклопластиком соответственно. Проводятся экспериментальные работы по созданию и исследованию слоистых материалов на основе титановых, магниевых сплавов в сочетании с угле-, стекло- и органопластиковыми [8, 9].

Опыт конструкторско-технологического освоения слоистых металлополимерных материалов в авиационной технике показал, что обшивки из материалов АЛОП, СИАЛ имеют высокую усталостную долговечность и стойкость к распространению усталостных трещин, что является важным преимуществом перед типовыми алюминиевыми обшивками. Рост усталостных трещин в обшивках из материала АЛОП происходит в 5 раз медленнее, чем в типовых алюминиевых обшивках, акустическая выносливость возрастает в 10 раз [10].

Необходимым условием надежной эксплуатации обшивок из гибридных слоистых материалов в составе авиационных конструкций является сохранение высокого уровня их механических характеристик при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды.

Поведение гибридных слоистых металлополимерных материалов и типовых металлических сплавов под влиянием природно-климатических факторов может существенно различаться. К основным причинам, вызывающим эти различия, относятся слоистость структуры, наличие внутренних поверхностей раздела «металл–полимер» и «полимер–армирующие волокна», а также остаточных термических напряжений, возникающих при формовании из-за существенной разницы коэффициентов линейного теплового расширения слоев металла и полимерного композита и т. д. [11–13].

Процессы, приводящие к изменению свойств гибридных металлополимерных материалов под действием факторов внешней среды, являются сложными и многоступенчатыми, протекают в листах алюминиевого сплава, слоях полимерного композита, на границах раздела компонентов. В результате этих процессов возможны появление коррозионных поражений в слоях металла, снижение уровня свойств полимерных слоев, нарушение адгезионного взаимодействия между слоями металла и полимерного композита. Эти процессы могут происходить как независимо друг от друга, так и взаимосвязано. Например, нарушение адгезионного взаимодействия на границе «металл–полимер» может быть следствием поглощения и переноса влаги полимерными слоями с последующим образованием очагов коррозии на внутренних поверхностях металла.

Цель данной работы – изучение климатической стойкости гибридных слоистых материалов класса «алюминий–органопластик» в естественных природных и лабораторных условиях. В данной статье приведены сведения о влиянии состава, особенностей технологии изготовления и условий экспонирования на климатическую стойкость материалов класса «алюминий–органопластик».

Материалы и методы

Объектом исследования являются гибридные слоистые материалы класса «алюминий–органопластик», состоящие из чередующихся тонких листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и высокопрочного органопластика на основе арамидных волокон СВМ. Свойства армирующих волокон СВМ:

Плотность, кг/м ³	1400
Прочность при растяжении, ГПа	4,0–4,5
Модуль упругости, ГПа	130

Исследованы равнопрочный материал марки Алор Д16/41, в котором слои органопластика армированы тканью из арамидных нитей СВМ линейной плотности 14,3 текс, и однонаправленный материал марки Алор Д16/41Н, армированный жгутом СВМ линейной плотности 58,0 текс. Листы материала Алор Д16/41 содержат три листа алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47–0,48 мм и два внутренних слоя органопластика толщиной 0,15 мм; листы материала Алор Д16/41Н – два листа алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47–0,48 мм и один внутренний слой органопластика толщиной 0,20 мм. В табл. 1 представлены свойства изученных материалов.

Таблица 1

Характеристики исследуемых материалов

Характеристики	Значения характеристик для материала		
	Алор Д16/41	Алор Д16/41Н	сплава Д16ч.-АТ
Плотность, кг/м ³	2350	2250	2780
Предел прочности при растяжении, МПа	410	650	415
Предел текучести, МПа	240	340	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	58	69	68
Малоцикловая усталость при $\sigma_{\max} = 160$ МПа, кцикл	120	Более 2000	80
Скорость роста трещины усталости, мм/кцикл ($\Delta K = 30$ МПа $\sqrt{м}$)	0,2	0,1	5

Листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н изготавливали методом автоклавного формования пакета, собранного из листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ, арамидной ткани и пленочного эпоксикаучукового связующего. Укладку жгутового наполнителя осуществляли методом намотки на плоскую оправку. Листы алюминиевого сплава Д16ч.-АТ предварительно подвергали анодному оксидированию в хромово-кислотном или сернокислотном электролите для повышения коррозионной стойкости и прочности адгезионного соединения с полимерным слоем [14, 15].

В ряде случаев отформованные листы материала класса «алюминий–органопластик» подвергали предварительному растяжению до уровня относительной деформации 1,8 % (остаточная деформация 0,5 %) для оптимизации остаточных термических напряжений. Такая технологическая операция позволяет существенно увеличить предел текучести и усталостную долговечность гибридного слоистого материала. Кроме того, операция пластического деформирования применяется при формообразовании обшивок одинарной и двойной кривизны. Поэтому исследование влияния пластического деформирования на климатическую стойкость материала класса «алюминий–органопластик» необходимо для обоснования технологий производства элементов конструкций.

Образцы для проведения физико-механических испытаний изготавливали из листов материала класса «алюминий–органопластик» методом механической обработки.

Климатическую стойкость материалов изучали в естественных и лабораторных условиях. На экспозицию в натуральных климатических условиях выставляли листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н размером 500×500 мм, а также образцы шириной 10 мм с незащищенными лакокрасочным покрытием торцами для имитации наиболее опасных условий при воздействии внешних факторов.

Для анализа влияния отдельных климатических факторов (влажности, температуры, хлоридов) на свойства материалов класса «алюминий–органопластик» образцы экспонировали в лабораторных условиях в соответствующих испытательных камерах:

– тропического климата (циклический режим испытаний: 8 ч при температуре 50 ± 5 °С и влажности 100 %; 12 ч при температуре 20 ± 5 °С и влажности 100 %; 8 ч при температуре 20 ± 5 °С и влажности 65 %);

– солевого тумана (распыление 5%-ного раствора NaCl в течение 3 мин, периодичность распыления 20 мин, температура в камере 35 °С).

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

Результаты и обсуждение

Климатическую стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминия и арамидного органопластика оценивали методами, применяемыми для полимерных композиционных материалов и металлов [16–18]. Исследовали стабильность физико-механических характеристик материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н после выдержки в климатических условиях, оценивали изменения внешнего вида листов, появление короблений, расслоений и т. д.

В табл. 2 представлены результаты климатических испытаний листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н после экспозиции в течение 5 лет в естественных условиях в зоне теплого влажного климата. Экспозицию проводили на открытой атмосферной площадке и под навесом. На экспозицию выставлены незащищенные лакокрасочным покрытием листы материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н в двух состояниях: подвергнутые и не подвергнутые предварительному растяжению (пластическому деформированию). В производстве метод пластического деформирования используется при формообразовании деталей из плоских листов [19].

Материалы Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н обладают высокой климатической стойкостью в условиях теплого влажного климата. После 5 лет экспозиции на открытой атмосферной площадке не наблюдается снижения свойств этих материалов. Следует отметить, что предварительное пластическое деформирование листов, а также наличие изгибной нагрузки при экспозиции не снизили климатическую стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н. После пятилетней экспозиции в теплом влажном климате листы не имели расслоений, вспучиваний и короблений.

Наблюдение за изменением внешнего вида листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н показало, что коррозия металлической поверхности при климатических испытаниях протекает без особенностей, аналогично коррозии листов алюминиевых сплавов. После 2 лет климатического старения появляются коррозионные поражения металлической поверхности листов в виде точек и пятен размером до 20 мм. Листы, подвергнутые предварительному пластическому деформированию, проявили меньшую стойкость к коррозии, чем листы нерастянутые. После экспозиции в течение 5 лет площадь коррозионных поражений составила 25–30 и 18–20 % поверхности для листов материала Алор Д16/41, подвергнутых и не подвергнутых пластическому деформированию соответственно. Основываясь на работе [20], авторы данной статьи предполагают, что причиной этого могут быть микротрещины на поверхности металла, образовавшиеся при пластическом деформировании листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н.

**Климатическая стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н
в условиях теплого влажного климата**

Материал	Условия экспозиции	Прочность при растяжении, МПа	Предел текучести при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Прочность при межслойном сдвиге, МПа
Алор Д16/41	В исходном состоянии	405	240	58	21
	5 лет под навесом	407	240	58	21
	5 лет на открытой площадке	407	240	58	21
Алор Д16/41 (подвергнутый пластическому деформированию)	В исходном состоянии	425	320	58	21
	5 лет под навесом	415	320	58	20
	5 лет на открытой площадке	415	320	58	20
	5 лет на открытой площадке под изгибной нагрузкой	415	320	58	21
Алор Д16/41Н (подвергнутый пластическому деформированию)	В исходном состоянии	655	340	69	14
	5 лет под навесом	610	340	69	14
	5 лет на открытой площадке	655	340	69	14

Показано, что листы слоистого гибридного металлополимерного материала проявляют большую устойчивость к климатическому старению, чем листы полимерного композиционного материала. В аналогичных условиях прочность стекло- и органоластиков снижается до уровня 75–80 % от исходных значений, в то время как свойства материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н сохраняются на исходном уровне. В отличие от полимерных композитов, образцы гибридного слоистого металлополимерного композита, вырезанные из экспонированных листов, имели стабильные свойства в течение всего периода исследований. Слои органоластика в листах материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н защищены поверхностными слоями алюминиевого сплава, что предотвращает проникновение влаги и их тепловлажностное старение. Благодаря этому обеспечивается высокая стабильность свойств металлополимерного слоистого материала.

Полученные данные свидетельствуют о высокой климатической стойкости листов материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н. Однако необходимо учитывать, что образцы для механических испытаний вырезали из листов без учета краевого эффекта. Такой подход не позволяет оценить влияние на климатическую стойкость кромок (торцов), по которым возможно проникновение влаги и электролитов из внешней среды в слои органоластика, а также их перенос на внутренние поверхности металлических листов.

В реальных конструкциях, выполненных из слоистых материалов, наиболее опасными являются зоны, расположенные вблизи открытых торцов. Такие зоны находятся в местах конструктивных отверстий, соединений и стыков деталей. Для имитации таких зон и определения влияния незащищенных торцов на климатическую стойкость материалов Алор Д16/41 и Алор Д16/41Н проводили испытания узких образцов (шириной 10 мм) без защиты лакокрасочными покрытиями.

Хотя в реальных конструкциях обязательно присутствует защита от внешних факторов в виде лакокрасочных покрытий, паст, герметиков [20–23], испытание узких образцов с открытыми торцами проводили с целью имитации наиболее жестких условий, которые могут возникнуть при эксплуатации (например, при случайном нарушении защитного покрытия). Кроме того, при использовании таких образцов появляется возможность провести ускоренные сравнительные испытания, позволяющие оценить степень влияния отдельных климатических факторов (влажности, присутствия электролитов и др.) на стойкость слоистого материала к климатическому старению.

На рис. 1 показано, как изменяется прочность при растяжении узких незащищенных лакокрасочным покрытием образцов материала Алор Д16/41 после экспозиции в различных условиях.

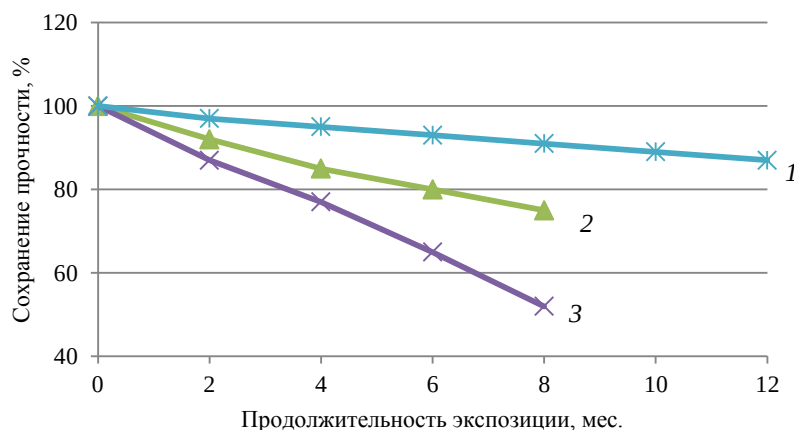


Рис. 1. Сохранение прочности при растяжении узких образцов материала Алор Д16/41 с незащищенными торцами после экспозиции в теплом влажном климате (1), камерах тропического климата (2) и солевого тумана (3). Подготовка поверхности металлических листов – анодное оксидирование в сернокислотном электролите

Наибольшие потери прочности образцов наблюдали после выдержки в камере солевого тумана, наименьшие – после естественного старения в условиях теплого влажного климата. Эти результаты свидетельствуют о существенном влиянии находящихся во внешней среде влаги и электролитов на климатическую стойкость образцов материала Алор Д16/41. Присутствие влаги и электролитов, проникающих к внутренним поверхностям раздела металла и органопластика, способствует снижению их адгезии, возникновению коррозии поверхностей металлических слоев, нарушению сплошности материала и, как результат, снижению прочности при растяжении узких незащищенных лакокрасочным покрытием образцов слоистого материала.

Стабильность механических характеристик слоистых материалов класса «алюминий–органопластик» при воздействии природно-климатических факторов зависит не только от коррозионной стойкости листов алюминиевого сплава, но и от адгезионной прочности соединения металлических листов. Важно, чтобы адгезионное соединение было устойчиво к проникновению влаги, электролитов и обеспечивало защиту внутренних поверхностей металлических листов от возникновения коррозии.

Условия природно-климатической среды (влажность, температура, концентрация солей и т. д.) проявляют различную степень активности по отношению к компонентам слоистого материала – металлу и органопластику. В органопластике процессы сорбции воды в камере тропического климата протекают более интенсивно, чем в камере солевого тумана [25–28]. Для слоев металла наиболее агрессивными являются условия камеры солевого тумана, где наиболее интенсивно проходят процессы коррозии.

На рис. 2 показано, что прочность при межслойном сдвиге материала Алор Д16/41 в значительной степени зависит от коррозионной активности среды, способствующей развитию коррозии на внутренних поверхностях металла, граничащих со слоем органопластика. Из этого следует, что важным фактором, определяющим климатическую стойкость слоистого гибридного материала класса «алюминий–органопластик», являются коррозионно-защитные свойства оксидного покрытия на поверхности алюминиевых листов.

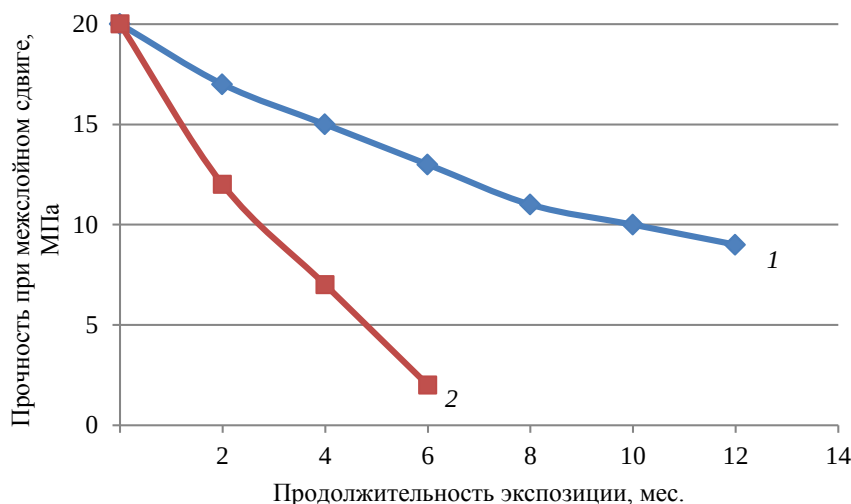


Рис. 2. Изменение прочности при межслойном сдвиге образцов материала Алор Д16/41 при экспозиции в камерах тропического климата (1) и солевого тумана (2). Подготовка поверхности металла – анодное оксидирование в хромовокислотном электролите

Типовые сернокислотные анодно-оксидные покрытия толщиной 7–12 мкм, используемые при подготовке поверхности под лакокрасочные покрытия, хорошо защищают алюминиевые сплавы от коррозии, но не обладает достаточной прочностью. Хромовокислотные оксидные покрытия при толщине 2–4 мкм имеют высокую прочность, но уступают сернокислотным анодно-оксидным покрытиям по коррозионно-защитным свойствам.

При разработке слоистых гибридных материалов класса «алюминий–органопластик» исследовали возможность повышения их коррозионной стойкости до уровня, достаточного для эксплуатации при наиболее коррозионно-опасных природно-климатических воздействиях, например в морском климате. Для решения этой задачи использовано анодное оксидирование, позволяющее получать более тонкие (толщиной 5–6 мкм) сернокислотные оксидные покрытия на поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ.

На рис. 3 представлены данные о климатической стойкости материала Алор Д16/41, экспонированного в различных условиях. Испытаниям подвергали незащищенные лакокрасочным покрытием узкие образцы (шириной 10 мм), чтобы не исключить влияния открытых торцов. Сернокислотное оксидное покрытие толщиной 5–6 мкм на листах алюминиевого сплава Д16ч.-АТ позволяет увеличить климатическую стойкость материала Алор Д16/41 по сравнению с хромовокислотным оксидным покрытием.

Уровень сохранения прочности при растяжении незащищенных лакокрасочным покрытием образцов материала Алор Д16/41 шириной 10 мм составляет 82–94 % от исходного значения при экспозиции в различных климатических зонах, включая морской климат. Это достигается путем подготовки поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ анодным оксидированием в сернокислотном электролите с образованием оксидного покрытия толщиной не более 5–6 мм.

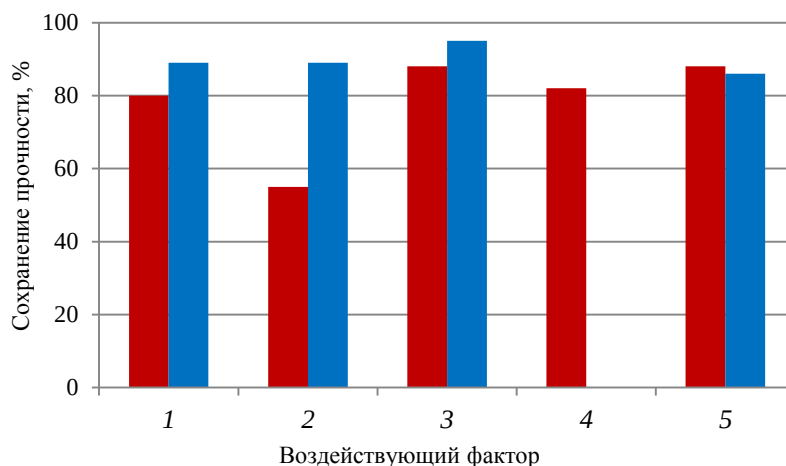


Рис. 3. Сохранение прочности при растяжении незащищенных лакокрасочным покрытием узких образцов материала Алор Д16/41 с анодно-окислительным хромовокислотным (■) и серноокислительным (■) покрытием после воздействия различных климатических условий: 1 – камера тропического климата (7 мес.); 2 – камера солевого тумана (8 мес.); 3 – теплый влажный климат, г. Батуми (10 мес.); 4 – морской климат, г. Гавана (12 мес.); 5 – морской климат, научно-исследовательское судно «Изумруд» (6 мес.)

Заключения

Исследована климатическая стойкость гибридных слоистых металлополимерных материалов типа «алюминий–органопластик» в различных природно-климатических и лабораторных условиях (теплый влажный и морской климат, камера солевого тумана и др.).

Установлено, что при экспозиции листов материала Алор Д16/41 в теплом влажном климате на открытой атмосферной площадке и под навесом не наблюдается снижения прочности, предела текучести и модуля упругости образцов. Предварительное пластическое деформирование, используемое для оптимизации остаточных термических напряжений или формообразования детали, не влияет на климатическую стойкость материала Алор Д16/41.

При экспозиции в различных климатических зонах уровень сохранения прочности при растяжении образцов материала Алор Д16/41 шириной 10 мм, не защищенных лакокрасочным покрытием, составляет 82–94 %. Для достижения такого эффекта поверхности листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ подвергали анодному оксидированию в серноокислительном электролите с образованием оксидного покрытия толщиной не более 5–6 мм.

Для защиты от климатических воздействий конструкций из материалов типа Алор Д16/41 применимы типовые защитные лакокрасочные покрытия, пасты, герметики. Защитные покрытия предотвращают коррозию поверхности металлических листов, проникновение влаги и электролитов в слои органопластика. Учитывая особенности структуры гибридных слоистых металлополимерных материалов, особое внимание при нанесении защитных покрытий необходимо уделять местам расположения отверстий, соединений и стыков листов. Кроме того, при разработке конструкций из гибридных слоистых материалов необходимо предусматривать конструктивные мероприятия, исключающие накопление влаги в элементах конструкции (отсутствие «карманов», дренаж и т. п.). При выполнении этих мер климатическая стойкость и надежность деталей из слоистых материалов типа Алор Д16/41 в процессе эксплуатации и хранения такие же, как и у деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 23–47.

2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites // *Metal Matrix Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series* / eds. J.N. Fridleander, I.H. Marshall. 1995. Vol. 03. P. 487–570.
4. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Y., Konovalov A.N. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft // *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. No. 3. P. 215–221.
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
6. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V. et al. Laminated Metal-Polymeric Materials in Structural Elements of Aircraft // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Vol. 8. No. 2. P. 211–221.
7. 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.
8. Железина Г.Ф., Колобков А.С., Кулагина Г.С., Кан А.Ч. Демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых, титановых сплавов и слоев органопластика // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
9. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
10. Машинская Г.П., Железина Г.Ф. Алюр // *Большая Российская энциклопедия*. М.: Большая российская энциклопедия, 2015. С. 518.
11. Старцев О.В., Кротов А.С., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Антипов В.В., Гращенков Д.В. Сорбция и диффузия влаги в слоистых металлополимерных композиционных материалах типа «СИАЛ» // *Материаловедение*. 2011. № 12. С. 38–44.
12. 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 металлогластикопластика класса СИАЛ // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 08.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.
13. Антипов В.В., Курс М.Г., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64.
14. Войтович В.А. Способы подготовки поверхности изделий из металлов и сплавов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2005. № 9. С. 19–23.
15. 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: 23.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
16. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 11. С. 19–27.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2011. № 1. С. 34–40.
18. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.

19. 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: 18.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // *Труды ВИАМ*. 2018. № 4 (24). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
21. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
22. Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области антикоррозионных полимерных составов для защиты от коррозии крепежных соединений контактных пар комбинированных конструкций (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-25-31.
23. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2. С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

References

1. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and objectives. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS; VIAM, 2002, pp. 23–47.
2. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites. *Metal Matrix Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series*. Eds. J.N. Fridlander, I.H. Marshall. 1995, vol. 3, pp. 487–570.
4. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Y., Konovalov A.N. Fiber Metal Laminates Based on Aluminum–Lithium Alloy Sheets in New-generation Aircraft. *Russian Engineering Research*, 2021, vol. 41, no. 3, pp. 215–221.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Shestov V.V., Sidelnikov V.V. Laminated hybrid materials on basis of Al–Li alloy sheets. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
6. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V. et al. Laminated Metal-Polymeric Materials in Structural Elements of Aircraft. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 211–221.
7. 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.
8. Zhelezina G.F., Kolobkov A.S., Kulagina G.S., Kan A.Ch. Damping properties of hybrid layered metal-polymer materials based on aluminum, titanium alloys and organoplastics layers. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19.
9. Yakovlev A.L., Nochovnaya N.A., Putyrskij S.V., Krohina V.A. Titanium-polymer laminated materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S2, pp. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
10. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F. Alor. *Great Russian Encyclopedia*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2015, p. 518.
11. Startsev O.V., Krotov A.S., Senatorova O.G., Anikhovskaya L.I., Antipov V.V., Grashchenkov D.V. Sorption and diffusion of moisture in layered metal-polymer composite materials of the «SIAL» type. *Materialovedenie*, 2011, no. 12, pp. 38–44.
12. 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: December 08, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

13. Antipov V.V., Kurs M.G., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu. Climatic field tests of SIAL type metal-polymer composition materials in marine climate. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64.
14. Voitovich V.A. Methods for preparing the surface of products made of metals and alloys. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 9, pp. 19–23.
15. 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: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
16. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. I. Aging mechanisms. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2010, no. 11, pp. 19–27.
17. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. III. Significant aging factors. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2011, no. 1, pp. 34–40.
18. Gladkikh A.V., Kurs I.S., Kurs M.G. Analysis of the data of full-scale climatic tests combined with the application of operational factors of nonmetallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
19. 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 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-65-77.
20. Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kozlov I.A., Volkov I.A., Petrova A.P. Surface preparation aluminum alloy V-1469 before use in the composition of layered hybrid material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 23, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
21. Nefedov N.I., Semenova L.V., Kuznecova V.A., Vereninova N.P. Paint coatings for protection of metallic and polymer composite materials against aging, corrosion and biodeterioration. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
22. Kuznetsova V.A., Semenova L.V., Shapovalov G.G. Development trends in the field of anticorrosive polymeric systems for corrosion protection of fixing connections of contact couples of combined structures (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-25-31.
23. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

Информация об авторах

Железина Галина Федоровна, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кулагина Галина Серафимовна, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кан Алексей Чангирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Galina F. Zhelezina, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Galina S. Kulagina, Head of Sector, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey Ch. Kan, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valeriy O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.04.2024.

The article was submitted 05.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.04.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО СФЕРОПЛАСТИКА ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ МАРКИ ВПЗ-7М

Н.С. Артемов¹, М.А. Капустянская¹, А.В. Коваленко¹, Н.К. Сидельников¹, А.О. Курносов¹

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

Аннотация. Проведен анализ влияния температурных режимов отверждения на физико-механические свойства двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М. На основе ранее изученных режимов отверждения смол, входящих в состав сферопластика, подобраны наиболее подходящие режимы его отверждения. Рассмотрена модель реакции отверждения полимерного заполнителя на основе экспериментальных данных, полученных методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Исследована микроструктура образцов сферопластика. Полученные результаты позволяют сделать выбор условий отверждения, которые требуются для достижения высоких характеристик материала.

Ключевые слова: сферопластик, полимерный заполнитель, микроструктура, полимерный композиционный материал, отверждение, эпоксидное связующее

Для цитирования: Артемов Н.С., Капустянская М.А., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносов А.О. Исследование влияния температурных режимов отверждения на физико-механические свойства двухкомпонентного сферопластика холодного отверждения марки ВПЗ-7М // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55.

Scientific article

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CURING TEMPERATURE CONDITIONS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TWO-COMPONENT COLD CURING SPHEROPLASTIC VPZ-7M

N.S. Artyomov¹, M.A. Kapustianskaia¹, A.V. Kovalenko¹, N.K. Sidelnikov¹, A.O. Kurnosov¹

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

Abstract. In this study, an analysis of the influence of curing temperature conditions on the physical and mechanical properties of two-component spheroplastics VPZ-7M is carried out. Based on previously studied curing modes of resins included in spheroplastics, the most suitable curing modes were selected. A model of the curing reaction of a polymer filler is considered based on experimental data obtained by differential scanning calorimetry. The microstructure of the samples of spheroplastic was studied. The obtained results allow making a choice of the curing conditions to achieve the required material characteristics.

Keywords: spheroplastic, polymer filler, microstructure, polymer composite material, curing, epoxy binder

For citation: Artyomov N.S., Kapustianskaia M.A., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O. Research of the influence of curing temperature conditions on the physical and mechanical properties of two-component cold curing spheroplastic VPZ-7M. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-45-55.

Введение

В современном мире ученые продолжают исследовать и расширять границы понимания физико-химических свойств материалов. Каждый год проводится большое количество научных исследований с целью разработки и улучшения методов синтеза новых полимеров, что позволяет получать полимерные материалы с уникальным сочетанием характеристик [1, 2].

Одним из самых востребованных и перспективных направлений в современном промышленном производстве считается разработка полимерных композиционных материалов (ПКМ). Процессы изготовления изделий из эпоксидных ПКМ (стекло-, угле-, органопластики с высокими упруго-прочностными свойствами) требуют длительных и энергоемких режимов отверждения, а эпоксидные материалы имеют низкую тепло-, огне- и трещиностойкость, а также высокое водопоглощение. Их широкое применение при производстве авиационных конструкций остается важным направлением в авиастроении [3–5]. Полимерные композиционные материалы обеспечивают изделиям оптимальное сочетание легкости и прочности, что представляет серьезную конкуренцию изделиям из стали и сплавов. К материалам, применяемым в авиационной и космической технике, предъявляются требования, в соответствии с которыми они должны быть как можно более легкими, надежными и не подверженными поломкам; выдерживать длительную эксплуатацию в экстремальных условиях, а также высокие температуры, возникающие при полетах на высоких скоростях или при входе в атмосферу; обладать стойкостью к коррозии под воздействием влаги, солей и других агрессивных сред и способностью выдерживать значительные аэродинамические нагрузки [6–8].

Экономическая эффективность производства ПКМ обуславливается их превосходящими эксплуатационными свойствами в сравнении с традиционными материалами. Увеличение ресурса изделий на основе ПКМ в 2–3 раза приводит к снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт [9].

В результате применения конструкций из ПКМ получаем: снижение массы изделий на 25–50 %, уменьшение трудоемкости, сокращение энергозатрат на изготовление сложных агрегатов в 8–10 раз, повышение коэффициента использования материала с 0,3 до 0,85, сокращение потерь от коррозии и расхода топлива, уменьшение материалоемкости в 1,6–3,5 раза. В сравнении с традиционными материалами ПКМ выгодно выделяются по таким основным параметрам, как плотность, модуль упругости, кратковременная и длительная прочность при растяжении, ползучесть, сопротивление усталости и демпфирующая способность [10].

При производстве основных компонентов для авиационной промышленности большое внимание уделяется преимуществам ПКМ, таким как высокая устойчивость к агрессивным средам и неблагоприятным условиям эксплуатации, а также относительно низкая плотность материалов. В некоторых планерах современных самолетов доля таких материалов составляет до 60 % [11].

Одной из разновидностей ПКМ являются легкие полимерные наполнители – сферопластики. Значительная (>50 %) пористость этих материалов обусловлена применением в качестве наполнителя полых частиц, благодаря чему достигаются существенные весовые преимущества, что имеет важное значение при разработке конструкций для оборонно-промышленного комплекса, авиации, судостроения и других областей промышленности [12, 13].

В частности, значительный интерес представляет двухкомпонентный сферопластик холодного отверждения марки ВПЗ-7М (ТУ 22.21.42-110-07545412–2023) на основе эпоксидной и полиамидной смол. Основным наполнителем данного сферопластика являются стеклянные микросферы, представленные в виде мелкодисперсных порошков из пустотелых сфер с тонкими стенками. Функциональная особенность данных частиц заключается в их низкой плотности, что способствует уменьшению общей плотности

композиционного материала и достигается существенная весовая эффективность [14]. Они применяются для точечного усиления конструкций с сотовой структурой, закрытия торцов и заполнения рабочих пустот в соединительных элементах авиационного оборудования. Материал улучшает процесс компоновки сотовых конструкций, принимает участие в распределении и переносе действующих нагрузок, при этом обеспечивая требуемые показатели прочности и долговечность соединений [15, 16].

Применение пустотелых стекломикросфер в составе композиционных материалов обусловлено их доступностью, радиопрозрачными свойствами и относительно высокими физико-механическими свойствами [17].

Полимерная основа и микросферы являются ключевыми составляющими и определяют технологические свойства и уровень эксплуатационных характеристик отвержденного материала в составе изделия [18]. Исследование процесса отверждения направлено на изучение температурных режимов как одного из факторов, влияющих на физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-7М. Полученные результаты могут быть полезны как для улучшения технологии производства, так и качества готовой продукции.

Исследование и анализ свойств образцов двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М осуществляли в следующей последовательности:

- отверждение образцов сферопластика по выбранным температурным режимам и их механическая обработка для получения размеров и формы, соответствующих требованиям испытаний;
- определение плотности для контроля соответствия нормативным требованиям;
- механические испытания на сжатие образцов, отвержденных при выбранных температурных режимах, чтобы оценить поведение материала при нагрузках;
- проведение термического анализа методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения температурных точек, при которых происходят фазовые переходы, с выявлением степени отверждения образцов и температуры их деструкции;
- исследование и анализ микроструктуры с применением сканирующей электронной микроскопии для обнаружения изменений на микро- и макроструктурном уровне;
- анализ полученных данных для выявления зависимости между температурным режимом и физико-механическими свойствами сферопластика;
- разработка рекомендации по выбору температурных режимов изготовления сферопластика на основании результатов проведенных испытаний с целью улучшения его свойств и повышения эффективности использования.

Такой подход позволил оценить зависимость физико-механических свойств двухкомпонентного сферопластика холодного отверждения от температурных режимов.

Материалы и методы

Исследуемый материал – двухкомпонентный сферопластик марки ВПЗ-7М, способный выдерживать эксплуатационные нагрузки при температуре до 80 °С. Исходными компонентами для полимерной основы служат эпоксидная и полиамидная смолы.

Полимерная основа, используемая для получения сферопластика ВПЗ-7М, обладает рядом ключевых свойств:

- высокие адгезионные и прочностные характеристики;
- отсутствие объемной усадки при отверждении;
- повышенное сопротивление усталости и способность выдерживать циклические нагрузки;
- сопротивление к образованию микротрещин;
- устойчивость при воздействии влаги и других агрессивных сред.

В качестве основного дисперсного наполнителя используются полые стеклянные микросферы.

Для испытаний сферопластика марки ВПЗ-7М изготовили образцы из компонентов А и Б, состоящих из эпоксидной и полиамидной смол, антипирена, пигментов и стеклянных микросфер. Для оценки уровня сохраняемости свойств сферопластика проведены также исследования образцов из компонентов А и Б после хранения в течение 9 мес. при выбранных температурных режимах.

Выбор режимов отверждения образцов сферопластика определяли исходя из рекомендуемых режимов отверждения, взятых из научно-технического источника [19].

В работе применяли следующие методы исследований:

– определение плотности проведено по ГОСТ 15139–69 «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)», п. 2;

– определение предела прочности при сжатии проведено по ГОСТ 4651–2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» при температуре 21 ± 3 °С и относительной влажности воздуха 40 ± 10 %;

– определение степени отверждения, температуры стеклования и термодеструкции проведено по ГОСТ Р 56755–2015 с использованием метода ДСК, который позволяет измерять тепловые эффекты, происходящие в материале при изменении температуры, и определять температурный промежуток стеклования и степень отверждения образцов;

– исследование микроструктуры методом электронной сканирующей микроскопии проведено по ММ 1.595-12-243–2007 для понимания изменений во внутренней структуре образцов сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленных при различных температурных режимах, а также изучены морфология и структура материала на микроуровне, что позволило выявить изменения в кристаллической решетке, дефекты и оценить равномерность структуры.

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

Результаты и обсуждение

Для определения продолжительности отверждения сферопластика проведены испытания образцов после 24, 48 и 72 ч отверждения при температуре 23 °С. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Свойства двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М
после отверждения по различным режимам**

Свойство	Значение свойства* после отверждения в течение, ч		
	24	48	72
Прочность при сжатии при температуре 23 ± 2 °С, МПа	$\frac{32-41}{37}$	$\frac{36-45}{43}$	$\frac{38-47}{44}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

На основании полученных свойств установлено, что продолжительность полного отверждения двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М составляет от 48 до 72 ч. За время полного отверждения при температуре 23 °С приняли 72 ч для сравнения с другими режимами.

Выбор режимов отверждения образцов при повышенной температуре определяли исходя из рекомендуемых режимов отверждения для полиамидной и эпоксидной смол, входящих в состав сферопластика. Для сравнения взяты три режима отверждения:

- режим 1 – при температуре 23 °С в течение 72 ч;
- режим 2 – при температуре 65 °С в течение 2 ч;
- режим 3 – при температуре 40 °С в течение 6 ч + при 100 °С в течение 6 ч.

Испытание на сжатие позволяет получить комплексное представление о воздействии температурных режимов отверждения на физико-механические свойства сферопластика марки ВПЗ-7М. С помощью данного метода можно определить наиболее эффективные способы отверждения сферопластика для получения высоких результатов. Результаты испытаний физико-механических свойств представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства* двухкомпонентного сферопластика марки ВПЗ-7М

Режим отверждения	Продолжительность отверждения, ч	Температура отверждения, °С	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
<i>Физико-механические свойства в исходном состоянии</i>				
1	72	23	$\frac{610-617}{614}$	$\frac{44-48}{46}$
2	2	65	$\frac{584-619}{605}$	$\frac{53-57}{55}$
3	6 + 6	40 + 100	$\frac{602-621}{613}$	$\frac{52-54}{53}$
<i>Физико-механические свойства после 9 мес. хранения компонентов</i>				
1	72	23	$\frac{609-627}{620}$	$\frac{47-49}{48}$
2	2	65	$\frac{606-618}{612}$	$\frac{51-54}{52}$
3	6 + 6	40 + 100	$\frac{610-624}{616}$	$\frac{50-55}{52}$

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Структура полимера и содержание наполнителей оказывают влияние на температуру стеклования. Этот критерий обладает значительной практической важностью и является гарантией продуктивного применения сферопластика [20]. В качестве максимального температурного порога работоспособности этого материала установлена его температура стеклования при режиме отверждения 1, равная 80 °С. Результаты определения температуры стеклования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели температуры стеклования и начала термоокислительной деструкции полимерного сферопластика марки ВПЗ-7М

Показатель	Режим отверждения	Средние значения показателя
Температура стеклования, °С	1	69
	2	73
	3	96
Температура начала интенсивной термоокислительной деструкции, °С	1	195
	2	197
	3	200

Результаты определения тепловых эффектов химической реакции в образцах сферопластика методом ДСК показали, что изменение температурного режима формования полимерного наполнителя оказывает влияние на степень отверждения. Степень конверсии в случае использования режима отверждения 1 составила 95 %, при использовании режима отверждения 2 степень отверждения: 93 %, при режиме отверждения 3: 99 %. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

Образцы новой партии и партии после хранения компонентов в течение 9 мес. обладают схожими показателями значений прочности при сжатии, средней температуры стеклования и термодеструкции при отверждении по различным режимам. Это

показывает, что в течение продолжительного времени характеристики исходных компонентов полимерного наполнителя остаются на первоначальном уровне.

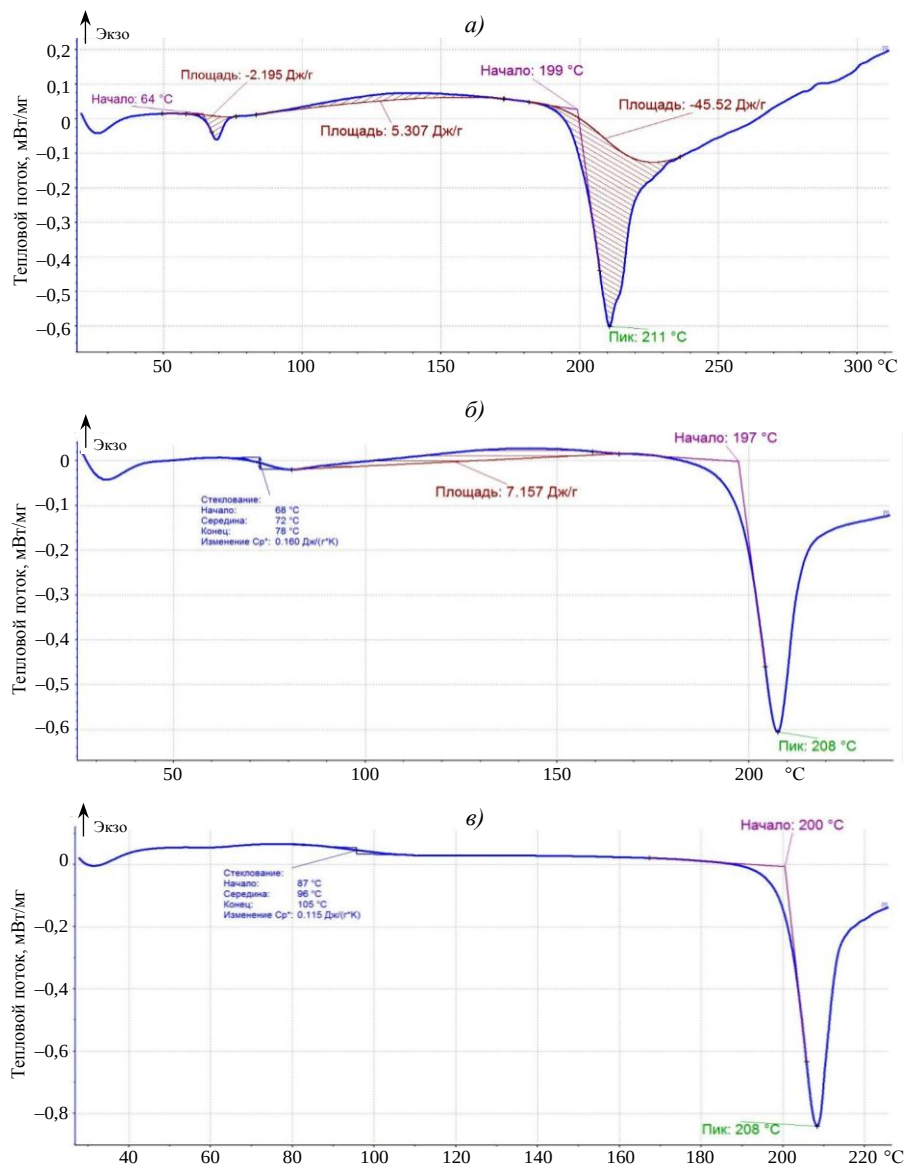


Рис. 1. ДСК-кривые отвержденных по режимам 1 (а), 2 (б) и 3 (в) образцов сферопластика

Для исследования микроструктуры подготовлены низкотемпературные сколы образцов: перед разрушением отвержденные образцы сферопластика замораживали в жидком азоте. Это делается для того, чтобы в структуре скола при пластической деформации были минимальные изменения.

Методом сканирующей электронной микроскопии проведены исследования низкотемпературных сколов образцов сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленных по трем режимам отверждения из компонентов А и Б новой партии и после их хранения в течение 9 мес.

Изготовленные в жидком азоте низкотемпературные сколы сферопластика марки ВПЗ-7М приклеивали с помощью токопроводящего клея на основе углерода к держателям образцов сканирующего электронного микроскопа и сушили на воздухе. После полного высыхания клея при комнатной температуре поверхности сколов подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке.

Для снятия электрических зарядов при исследовании образцов в сканирующем электронном микроскопе их поверхности металлизировали в установке магнетронного распыления.

Подготовленные таким образом образцы исследовали в сканирующем электронном микроскопе в режиме вторичных SE-электронов при увеличениях от $\times 50$ до $\times 10000$ (рис. 2–5).

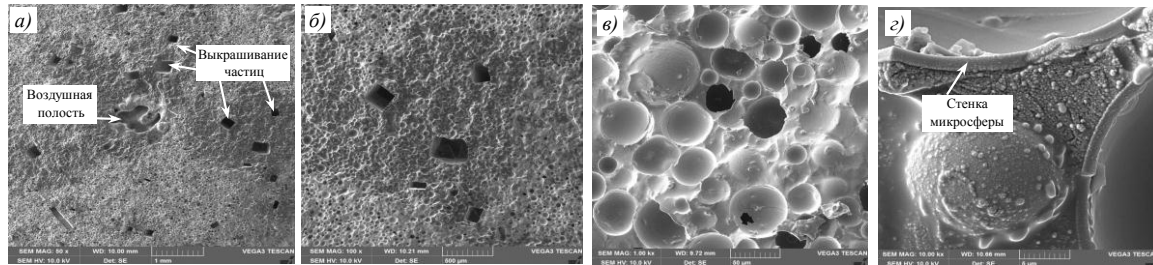


Рис. 2. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скла сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного из компонентов по режиму отверждения 1 при температуре 23 °С в течение 72 ч

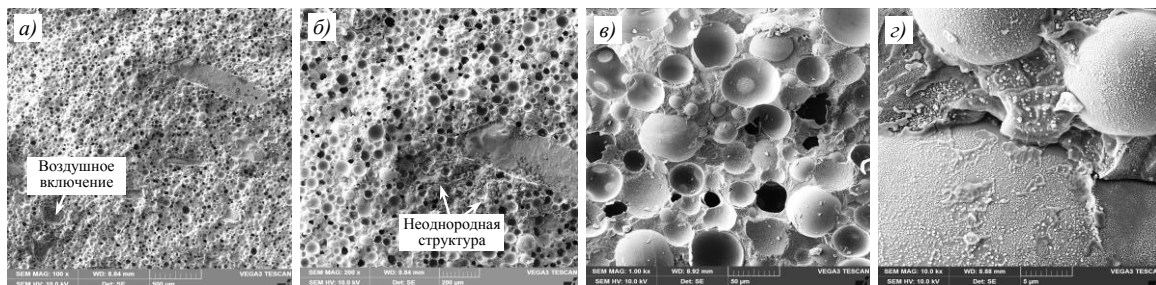


Рис. 3. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скла сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного из компонентов по режиму отверждения 2 при температуре 65 °С в течение 2 ч

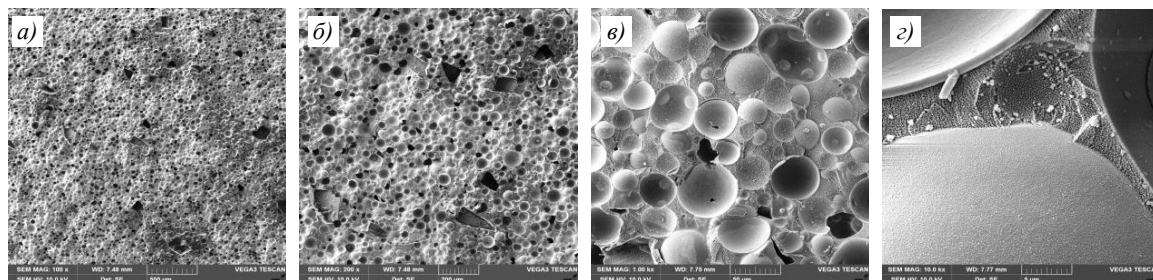


Рис. 4. Микроструктура после 9 мес. хранения низкотемпературного скла сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму отверждения 3 при температуре 40 °С в течение 6 ч + при 100 °С в течение 6 ч

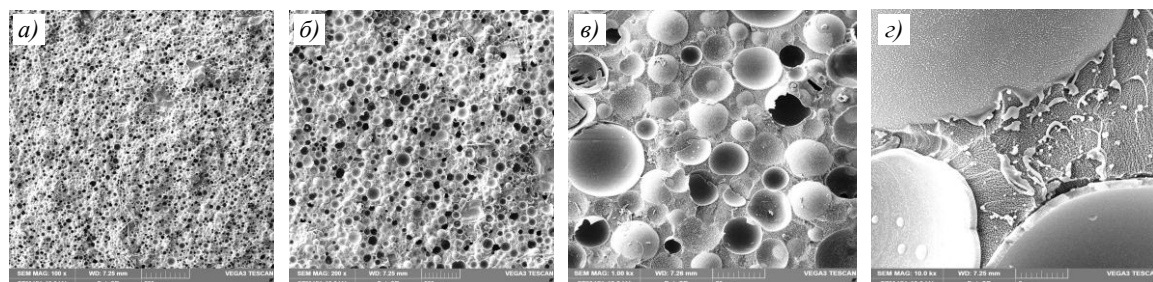


Рис. 5. Микроструктура низкотемпературного скла сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму отверждения 2 при температуре 65 °С в течение 2 ч

Микроструктурные исследования сколов сферопластика марки ВПЗ-7М показали, что в объеме образцов хаотично распределены полые микросферы размерами от 20 до 110 мкм с толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мкм. Выявлено, что сферопластик наполнен порошкообразными частицами прямоугольной и неправильной формы (рис. 2–5). Предположительно ими являются частицы кристаллов антипирена, используемого в качестве антипирена в составе данного заполнителя.

Микроструктурные исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 1, показали (рис. 2) что при изготовлении скола происходит выкрашивание порошкообразных частиц прямоугольной формы из отвержденного образца (рис. 2, а, б). В объеме данного образца выявлена крупная воздушная полость (рис. 2, а). Разрушение отвержденного образца происходит как по границе раздела «микросфера–матрица», так и по микросфере с ее разрушением (рис. 2, в, г). Микрофазовая структура матрицы состоит из сферических частиц размерами от 140 до 350 нм, которые образуют более крупные агрегаты (рис. 2, г).

Исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 2, показали (рис. 3), что при изготовлении скола не происходит выкрашивания порошкообразных частиц из отвержденного образца (рис. 3, а, б). Обнаружены единичные воздушные включения (рис. 3, а) и области с неоднородной структурой (рис. 3, б). Механизм разрушения идентичен вышеописанному образцу (рис. 3, в, г). Микрофазовая структура матрицы состоит из дисперсных частиц, размеры которых лежат в диапазоне от 120 до 200 нм (рис. 3, г).

В образце сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного после 9 мес. хранения компонентов по режиму 3, не обнаружено воздушных полостей и включений (рис. 4). При изготовлении скола происходит выкрашивание порошкообразных частиц прямоугольной формы из отвержденного образца (рис. 4, а, б). Механизм разрушения отвержденного образца сохраняется (рис. 4, в, г). Размеры микродисперсных частиц микрофазовой структуры матрицы находятся в диапазоне от 100 до 130 нм (рис. 4, г).

Микроструктурные исследования поверхности скола сферопластика марки ВПЗ-7М, изготовленного по режиму 2, показали (рис. 5), что разрушение отвержденного образца проходит по границе раздела «микросфера–матрица» с разрушением микросфер. Не выявлены выкрашивания порошкообразных частиц из отвержденного образца, а также воздушные включения (рис. 5, а, б). Микрофазовая структура матрицы состоит из микродисперсных частиц размерами от 80 до 125 нм, образующих более крупные агрегаты (рис. 5, г).

Во всех исследуемых сколах происходит ориентация матрицы на границе раздела с микросферами (рис. 2, г; 3, г; 4, г; 5, г).

Заключения

Испытания на сжатие выявили, что при температурных режимах отверждения 2 и 3 материал приобретает более высокую механическую прочность, что важно в случае его применения в условиях повышенных нагрузок. Однако следует учитывать, что неконтролируемые температурные изменения могут привести к снижению физико-механических характеристик.

Микроструктурные исследования скола сферопластика марки ВПЗ-7М показали, что в объеме образца равномерно распределены микросферы. Микрофазовая структура матрицы однородная, состоит из агрегатов дисперсных частиц, что подтверждает гипотезу о микрокомпозитном строении полимерной матрицы, представляющей собой однородную дисперсионную среду, в которой распределены частицы микродисперсной фазы.

В ряде образцов обнаружены вкрапления порошкообразных частиц, предположительно кристаллы антипирена. Следует вывод, что размер фракций кристаллов антипирена влияет на качество отвержденного образца, так как появляются области с неоднородной структурой, что в свою очередь ведет к ухудшению прочностных характеристик.

По результатам проведенных исследований тепловых эффектов методом ДСК определены температурные промежутки стеклования и степень отверждения образцов.

Степень отверждения образца сферопластика после температурного режима 3 увеличивается, что подтверждается повышением начала температуры стеклования на кривой отверждения.

В случаях, когда требуется высокая степень отверждения и максимальные прочностные свойства, рекомендуется использовать режим отверждения 3. В условиях с меньшими требованиями, когда скорость отверждения является более важным фактором, можно использовать режим отверждения 2. При отсутствии возможности проводить отверждение при повышенной температуре следует использовать режим отверждения 1.

Таким образом, для выбора процесса отверждения и достижения желаемых характеристик изделий из сферопластика требуется учитывать влияние температурного режима на его физико-механические характеристики.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Е.В. Куршеву и С.Л. Лонскому, за подготовку образцов и проведение их микроструктурных исследований, Г.Б. Эльдяевой – за проведение ДСК-анализа.

Список источников

1. Застрогина О.Б., Синякова С.Д., Серкова Е.А. Материалы на основе фенолформальдегидных олигомеров резольного и новолачного типов (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-55-65.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
3. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
4. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
5. Малышева Г.Н., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
6. Тростянская Е.Б., Головкин Г.С., Дмитренко В.П. Перспективные ПКМ и прогрессивные технологии производства из них элементов конструкции ЛА // Авиационная промышленность. 1987. № 2. С. 37–42.
7. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
8. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.
9. Капустянская М.А., Гуревич Я.М., Мишуров К.С. Полимерный наполнитель для технологии ускоренного формования // Пластические массы. 2023. № 11–12. С. 50–53. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-50-53.
10. 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: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих для авиакосмической техники. Обзор // Вопросы материаловедения. 2016. № 4 (88). С. 50–62.

12. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. СПб.: Профессия, 2020. 576 с.
13. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
14. Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Соколов И.И., Тундайкин К.О. Сферопластик с регулируемой вязкостью для заполнения участков сотовых конструкций // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
15. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
16. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
17. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
18. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
19. Каталог продукции: Полиамидные отвердители // ХИМЭКС Лимитед LTD. С. 48. URL: <http://chimexltd.com/catalog/otverditeli-uskoriteli-otverzhdeniya/poliamidnye-otverditeli/> (дата обращения: 01.03.2024).
20. Осипчик В.С., Олихова Ю.В., Нгуен Л.Х., Луцейкин Г.А., Аристов В.М. Определение температуры стеклования эпокси-силоксановой композиции термическими методами анализа // Пластические массы. 2017. № 7–8. С. 34–37.

References

1. Zastrogina O.B., Sinyakov S.D., Serkova E.A. Materials based on phenolformaldehyde oligomers of resol and novolac types (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-55-65.
2. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aircraft. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
3. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
4. Mikhailin Yu.A. *Heat-resistant polymers and polymer materials*. St. Petersburg: Profession, 2006, 624 p.
5. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
6. Trostyanskaya E.B., Golovkin G.S., Dmitrenko V.P. Promising PCMs and advanced technologies for the production of aircraft structural elements from them. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1987, no. 2, pp. 37–42.
7. Kablov E.N. Materials for aerospace technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
8. Bulanov I.M., Vorobey V.V. *Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials*. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 1998, 516 p.
9. Kapustyanskaya M.A., Gurevich Ya.M., Mishurov K.S. Polymer filler for accelerated molding technology. *Plasticheskiye massy*, 2023, no. 11–12, pp. 50–53. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-11-12-50-53.

10. 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 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Kurnosov A.O., Raskutin A.E., Mukhametov R.R., Melnikov D.A. Polymer composite materials based on thermosetting polyimide binders for aerospace engineering. Review. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 4 (88), pp. 50–62.
12. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. *Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them*. St. Petersburg: Profession, 2020, 576 p.
13. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for the aircraft cabin. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
14. Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Sokolov I.I., Tundaykin K.O. Spheroplastic with adjustable viscosity for filling sections of honeycomb structures. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-37-43.
15. Pavlyuk B.Ph. The main directions in the field of development of polymeric functional materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
16. Aristova E.Yu., Denisova V.A., Drozhzhin V.S. et al. Composite materials using hollow microspheres. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
17. Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Influence of fillers on properties of adhesive pre-pregs and PCM on their basis. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
18. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
19. *Polyamide hardeners CHIMEX Limited LTD*. Available at: <http://chimexltd.com/catalog/otverditeli-uskoriteli-otverzhdeniya/poliamidnye-otverditeli/> (accessed: March 01, 2024).
20. Osipchik V.S., Olikhova Yu.V., Nguyen L.H., Lushcheykin G.A., Aristov V.M. Determination of the glass transition temperature of an epoxy-siloxane composition by thermal analysis methods. *Plasticheskiye massy*, 2017, no. 7–8, pp. 34–37.

Информация об авторах

Артемьев Никита Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Капустянская Мария Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коваленко Антон Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сидельников Николай Константинович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Курносков Артем Олегович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikita S. Artyomov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria A. Kapustianskaia, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton V. Kovalenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolai K. Sidelnikov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artyom O. Kurnosov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.06.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.06.2024.

Научная статья

УДК 620.197

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-56-65

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ЗАЩИТНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ

В.В. Антипов¹, С.А. Будиновский¹, А.С. Бенклян¹, С.В. Татарников¹

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

Аннотация. Представлены результаты испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150 °С образцов из сплава ЖС32 с ионно-плазменными двухслойными конденсационно-диффузионными покрытиями из никелевых сплавов ВСДП-3, СДП-2, СДП-42 и алюминиевого сплава ВСДП-16. Показано, что в зависимости от исходной толщины покрытия обеспечивают защиту сплава ЖС32 на базах испытаний от 100 до 400 ч. Определена средняя скорость снижения удельной массы для 9 видов покрытий. Показана возможность прогнозирования ресурса работы покрытий с использованием этой характеристики.

Ключевые слова: ионно-плазменная технология, жаропрочные никелевые сплавы, ионно-плазменные покрытия, изотермическая жаростойкость

Для цитирования: Антипов В.В., Будиновский С.А., Бенклян А.С., Татарников С.В. Прогнозирование срока службы защитных ионно-плазменных покрытий по результатам испытаний на жаростойкость // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-56-65.

Scientific article

PREDICTING THE SERVICE LIFE OF PROTECTIVE ION-PLASMA COATINGS BASED ON THE RESULTS OF HEAT RESISTANCE TESTS

V.V. Antipov¹, S.A. Budinovskiy¹, A.S. Benklyan¹, S.V. Tatarnikov¹

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

Abstract. The results of tests for isothermal heat resistance at a temperature of 1150 °C of samples from the ZhS32 alloy with ion-plasma double-layer condensation-diffusion coatings made of nickel alloys VSDP-3, SDP-2, SDP-42 and aluminum alloy VSDP-16 are presented. It is shown that, depending on the initial thickness of the coating, the protection of the ZhS32 alloy is provided at test bases from 100 to 400 hours. The average rate of specific gravity reduction for 9 types of coatings has been determined. The possibility of predicting the service life of coatings using this characteristic is shown.

Keywords: ion-plasma technology, heat-resistant nickel alloys, ion-plasma coatings, isothermal heat resistance

For citation: Antipov V.V., Budinovskiy S.A., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Predicting the service life of protective ion-plasma coatings based on the results of heat resistance tests. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-56-65.

Введение

В настоящее время перед современной наукой стоят задачи по разработке новых уникальных конструкционных материалов и технологий для производства как газотурбинных двигателей, так и газотурбинных установок. Одним из способов повышения рабочих характеристик, срока службы и надежности изделий авиационной и газотурбинной техники является нанесение на их поверхность различных защитных покрытий. Начиная с 1970-х гг. в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ успешно применяется вакуумно-дуговой метод нанесения защитных покрытий на детали горячего тракта газотурбинных двигателей. Метод вакуумно-дугового осаждения является одним из самых применяемых методов нанесения функциональных покрытий, с помощью которого можно осаждают чистые металлы, сплавы, нитриды, карбиды, оксиды и т. д. Энергия осаждаемых частиц составляет $\sim(10-1000)$ эВ, что обеспечивает отличную адгезию и высокую плотность покрытий, возможность осаждавать многокомпонентные сплавы с высокой воспроизводимостью, а также технически легко реализуемую возможность обработки изделий любых размеров. Для нанесения функциональных покрытий вакуумно-дуговым методом на поверхность деталей турбин в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработано порядка трех десятков различных составов для трубных катодов установок типа МАП. Высокое качество покрытий, простота и надежность метода сделали установки типа МАП основным оборудованием для осаждения защитных покрытий на детали газотурбинных двигателей. Практически на всех авиастроительных комплексах Российской Федерации (и некоторых стран СНГ и Китая) имеется не менее одной установки типа МАП.

При разработке высокотемпературных покрытий для лопаток газовых турбин из жаропрочных сплавов для выбора составов с наиболее высокими защитными свойствами проводят испытания на жаростойкость в соответствии с требованиями ГОСТ 6130–71 или ГОСТ 9.312–89.

В первом случае жаростойкость покрытий оценивают весовым методом по изменению массы образцов после выдержки на воздухе при постоянной температуре в печи в течение заданного времени. Допускается непосредственное определение глубины коррозии путем измерения линейных размеров образца после удаления продуктов коррозии с его поверхности. Жаростойкость определяют за время испытаний (рекомендуется 20 % от предполагаемого ресурса), которое позволяет получить закономерность коррозионного процесса для последующей экстраполяции на заданный ресурс работы, превосходящих базу испытаний.

Вторая методика испытаний предусматривает оценку защитных свойств покрытий по изменению содержания в них основных легирующих компонентов с использованием электронно-зондовой микроскопии на металлографических шлифах, изготовленных из образцов с разной продолжительностью выдержки в печи. Покрытие считают исчерпавшим свои защитные свойства, если содержание в нем основных с точки зрения коррозионной стойкости элементов (алюминия и хрома) достигает уровня их содержания в основном сплаве образца.

Представленные методики испытаний трудоемки. Поэтому оба ГОСТа допускают оценивать коррозионную долговечность композиции «сплав–покрытие» в процессе и после испытаний на жаростойкость гравиметрическим методом по изменению массы образцов с покрытиями. Это позволяет провести сравнительные испытания для выбора покрытия с максимальной коррозионной стойкостью, но не дает конкретной информации по ожидаемому ресурсу работы композиции «жаропрочный сплав–защитное покрытие».

В данной работе представлены результаты сравнительных испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С трех видов конденсационно-диффузионных покрытий различной толщины на базе испытаний 400 ч. Для анализа полученных данных и прогнозируемого ресурса работы покрытий использован пакет электронных таблиц Excel.

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

Материалы и методы

Исследована изотермическая жаростойкость образцов диаметром 25 мм и толщиной 3 мм с монокристаллической структурой из жаропрочного литейного никелевого сплава ЖС32 с двухслойными ионно-плазменными (ИП) покрытиями, содержащими внутренний слой из никелевых сплавов толщиной 80, 40 и 20 мкм и внешний слой из алюминиевого сплава с привесом 10, 20 и 40 г/м² соответственно.

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 6130–71 «Методы определения жаростойкости», защитные покрытия каждого вида наносили на три образца на промышленной установке ИП-напыления МАП-2 по серийной технологии [1–3] с использованием трубных катодов из никелевых сплавов СДП-2, ВСДП-3, СДП-42 и алюминиевого сплава ВСДП-16. Установки типа МАП (МАП-1М, МАП-2, МАП-3) широко применяются в производстве авиационных газотурбинных двигателей различного назначения как в России, так и в ряде зарубежных стран. Многолетний опыт эксплуатации показал высокую надежность установок и стабильность ИП-технологии в условиях серийного и опытного производства [4–20]. Современные установки типа МАП (МАП-2 и МАП-3) являются полностью автоматизированной системой нанесения защитных покрытий. Управление установкой происходит посредством промышленного компьютера, контроллера, датчиков и программного обеспечения собственной разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Компьютерная система управления обеспечивает запись и хранение информации по проводимым технологическим процессам, а также непрерывно следит за нанесением покрытий и прерывает процесс в случае аварийной ситуации. Автоматизация процесса нанесения защитных покрытий не только значительно повышает качество и высокую степень воспроизводимости свойств покрытий от процесса к процессу, но и исключает влияние человеческого фактора, не позволяя оператору изменить заданные параметры технологического процесса нанесения покрытия или выполнить действия, приводящие к аварийной ситуации.

После нанесения никелевого (СДП-2, ВСДП-3 и СДП-42) и алюминиевого сплавов (ВСДП-16) образцы отожжены при температуре 1050 °С в течение 3 ч в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

В табл. 1 представлены полученные для каждого типа покрытия средние по трем образцам значения толщины слоев никелевых сплавов и значения удельных привесов алюминиевого сплава, а также средние значения удельного прироста массы образцов после нанесения покрытий. Для получения одинакового привеса алюминиевый сплав ВСДП-16 наносили в трех садках поочередно на все образцы с никелевым подслоем одинаковой толщины из сплавов ВСДП-3, СДП-2 и СДП-42.

В данной работе исследована жаростойкость образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 и жаростойких ИП-покрытий разной толщины при температуре 1150 °С на базе испытаний 400 ч. Через 10–25 ч испытаний проводили взвешивание трех образцов каждого вида (табл. 1) на аналитических весах с точностью 0,0001 г и определяли среднеарифметическую величину удельного

изменения их массы (отношение изменения массы образца к площади поверхности образца в исходном состоянии).

Таблица 1

Параметры конденсационно-диффузионных покрытий

Условный номер покрытия	Тип покрытия	Средние значения		
		толщины слоя никелевого сплава, мкм	удельного привеса алюминиевого сплава, г/м ²	прироста массы образцов с покрытием, г/м ²
1	ВСДП-3 + ВСДП-16	75,8	39,8	556
2		39,2	21,3	271
3		19,7	11,3	140
4	СДП-2 + ВСДП-16	76,1	39,8	548
5		40,3	21,3	280
6		18,9	11,3	145
7	СДП-42 + ВСДП-16	75,2	39,8	568
8		39,9	21,3	285
9		19,9	11,3	149

Исследование структуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с покрытиями в исходном состоянии и после испытаний на жаростойкость проводили на инвертированном микроскопе с цифровой системой обработки изображения при увеличении $\times 500$. Погрешность измерений линейных размеров элементов топологии в диапазоне от 1 до 1000 мкм – не более 0,3 %.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены полученные экспериментальные зависимости удельного изменения массы образцов с покрытиями девяти видов и без покрытия от продолжительности испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч. На всех графиках можно выделить три характерных зоны разной длительности. *Первая зона* продолжительностью до 10–15 ч практически одинаковая для всех покрытий. За это время постепенно реализуется процесс окисления поверхности образцов до формирования плотной защитной пленки на основе оксида алюминия, препятствующей дальнейшему доступу кислорода к подложке. Одновременно на границе «сплав–покрытие» происходит диффузионное взаимодействие покрытия с подложкой, так как температура испытаний на 100 °С превосходит температуру отжига образцов при нанесении покрытий. Диффузия ряда легирующих элементов из жаропрочного сплава к поверхности может приводить к снижению жаростойкости покрытия.

Вторая зона продолжительностью от нескольких десятков часов (рис. 1, в) до нескольких сотен часов (рис. 1, а) соответствует процессу установившегося динамического равновесия между поверхностью покрытия и внешней окислительной средой, когда повреждение оксидного защитного слоя на поверхности образцов компенсируется диффузией к поверхности и окислением алюминия из подложки.

Покрытие в *третьей зоне* сохраняет защитные свойства, но его толщина уменьшается. По мере исчерпания запаса алюминия в покрытии, в составе защитной пленки помимо оксида алюминия Al_2O_3 образуется менее жаростойкая шпинель $NiAl_2O_4$.

Видно (рис. 1), что, несмотря на различия в элементном составе и конструкции, все рассмотренные покрытия существенно повышают жаростойкость жаропрочного никелевого сплава ЖС32. С увеличением толщины слоя никелевого сплава и привеса алюминиевого слоя эффективность покрытия и срок его службы возрастают. По результатам испытаний наиболее жаростойкими свойствами обладают покрытия 1, 4 и 7 с подслоем из никелевых сплавов толщиной ~80 мкм и удельным привесом алюминиевого сплава ~40 г/м², т. е. с максимальным запасом алюминия (рис. 1, а).

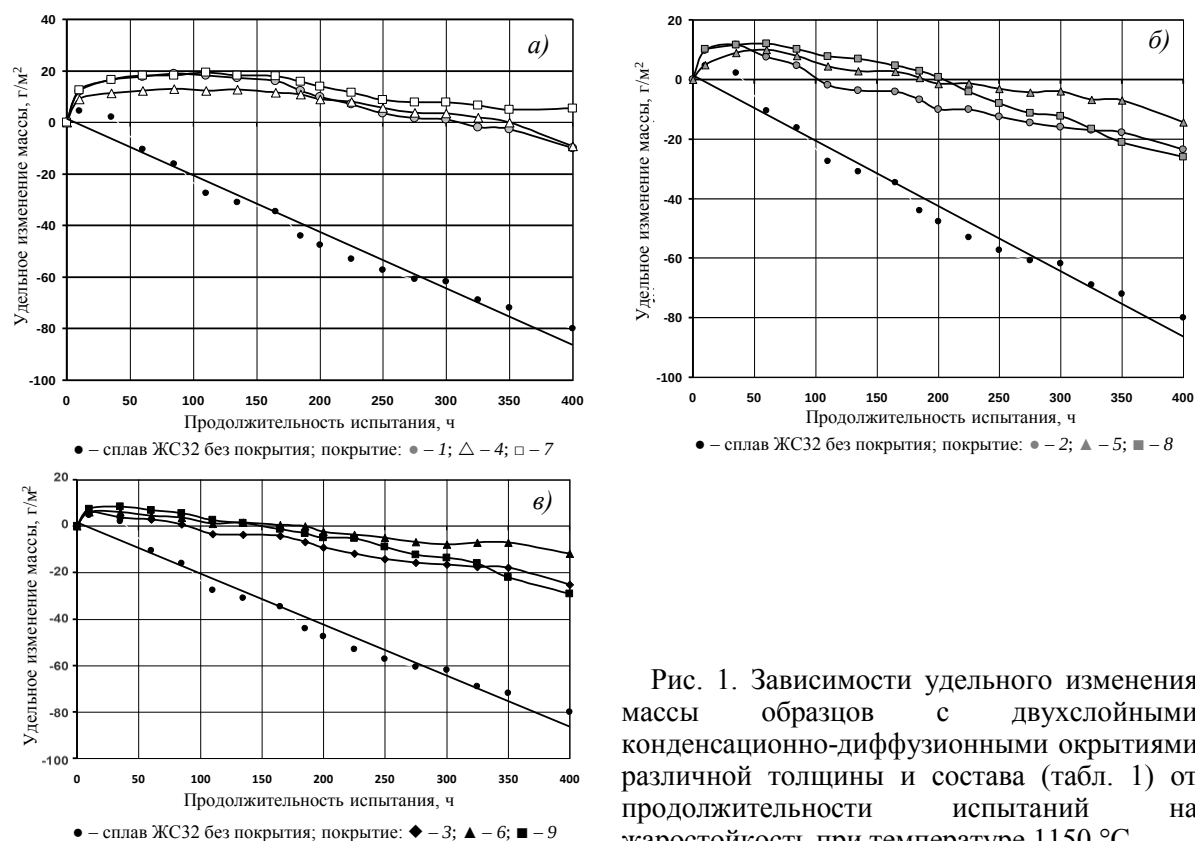


Рис. 1. Зависимости удельного изменения массы образцов с двухслойными конденсационно-диффузионными покрытиями различной толщины и состава (табл. 1) от продолжительности испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С

На рис. 2 представлены микроструктуры покрытий 1, 4 и 7 в исходном состоянии (а, г, ж), а также после 100 (б, д, з) и 200 ч (в, е, и) испытаний при температуре 1150 °С. В исходном состоянии покрытия имеют однотипную двухслойную структуру с внешним сплошным слоем на основе жаростойкой β -фазы (NiAl). Через 100 ч испытаний β -фаза присутствует в покрытии, но в виде отдельных блоков (рис. 2, б, д, з). После 200 ч испытаний доля β -фазы в покрытии значительно уменьшилась (рис. 2, в, е, и). В наибольшем количестве она сохранилась в покрытии 4 состава СДП-2 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²).

Следует отметить, что по ГОСТ 6130–71 «Методы определения жаростойкости» для оценки состояния покрытия и выбора наиболее жаростойкой композиции рекомендуется определять глубину коррозионного повреждения образца с покрытием или величину потери им удельной массы, которые показывают – какое из покрытий сохранилось в лучшей степени на выбранной базе испытаний, но не позволяют прогнозировать дальнейший ресурс работы композиции «сплав–покрытие».

Для анализа полученных результатов испытаний на жаростойкость в пакете программ Excel проведена аппроксимация линейной функцией экспериментальных зависимостей изменения удельной массы образцов с покрытиями от продолжительности испытаний в диапазоне 30–400 ч и построены линии трендов (рис. 3).

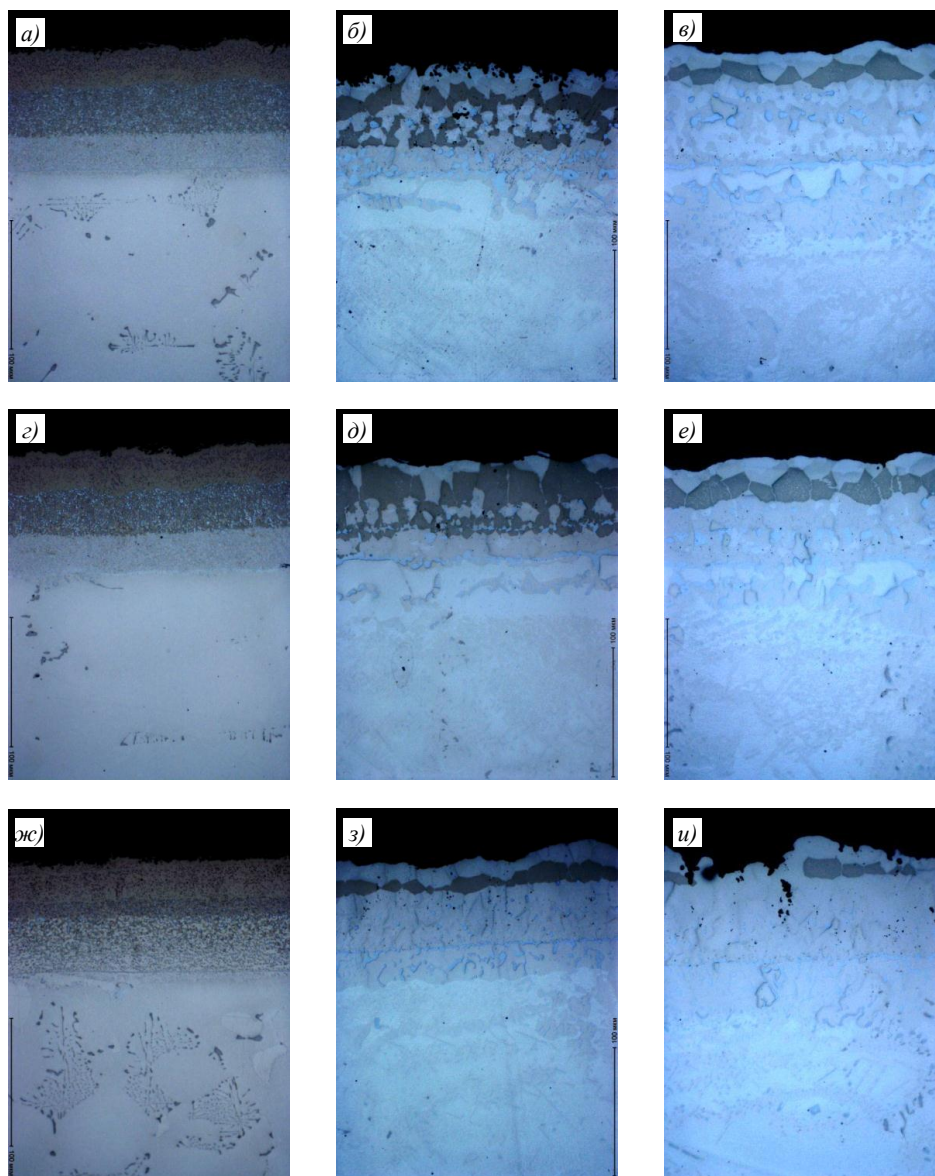


Рис. 2. Микроструктура покрытий ВСП-3 + ВСП-16 (а–в), СДП-2 + ВСП-16 (г–е) и СДП-42 + ВСП-16 (ж–и) в исходном состоянии (толщина никелевого сплава 80 мкм, удельный привес алюминиевого сплава 40 г/м²) и после испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С в течение 100 (б, д, з) и 200 ч (в, е, и)

В табл. 2 представлены линейные уравнения зависимости удельной потери массы образцов с покрытиями (y) от продолжительности испытаний (x) (табл. 2, колонка 3). В уравнениях коэффициент перед абсциссой x представляет собой среднее расчетное значение скорости потери удельной массы для каждого типа рассмотренных покрытий.

Зная величину скорости снижения удельной массы образцов с покрытиями, для выбора наиболее жаростойкой композиции в качестве критерия можно использовать продолжительность достижения нулевого значения ($y = 0$) в процессе испытаний (табл. 2, колонка 5).

Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для экстраполяции и прогноза продолжительности до полного разрушения покрытия до подложки по величине прироста массы образцов от нанесенного покрытия (табл. 2, колонка 6).

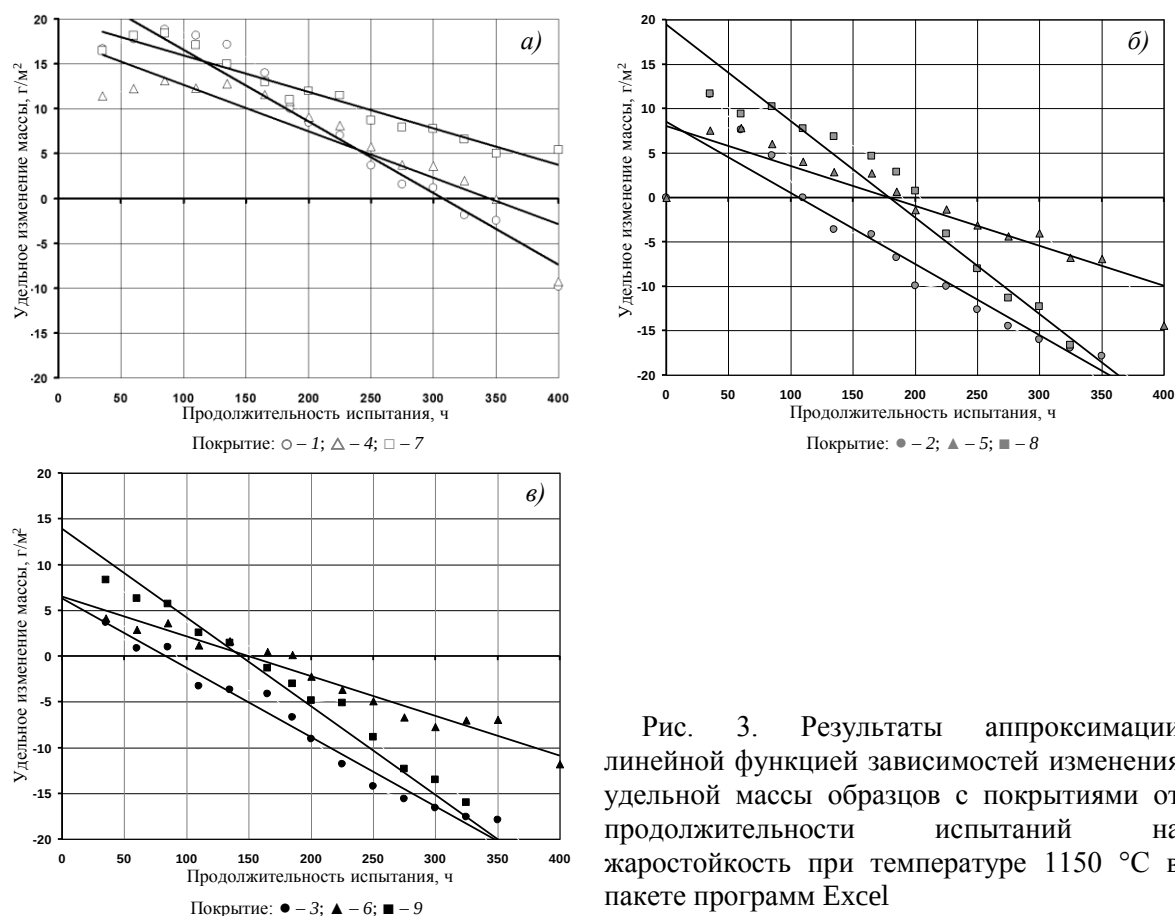


Таблица 2

Прогнозирование срока службы образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с двухслойными конденсационно-диффузионными ИП-покрытиями по результатам аппроксимации результатов испытаний на жаростойкость при температуре 1150 °С на базе 400 ч

Условный номер покрытия	Тип покрытия	Уравнение линии тренда	Достоверность аппроксимации R^2	Расчетная продолжительность, ч	
				достижения нулевого привеса	до полного разрушения покрытия
1	2	3	4	5	6
1	ВСДП-3+ ВСДП-16	$y = -0,0798x + 24,531$	0,94	307	7275
2		$y = -0,0801x + 8,5128$	0,90	106	3490
3		$y = -0,0758x + 6,3138$	0,97	83	1930
4	СДП-2+ ВСДП-16	$y = -0,0619x + 17,865$	0,83	289	9142
5		$y = -0,0449x + 8,0351$	0,80	179	6415
6		$y = -0,0434x + 6,5093$	0,95	150	3491
7	СДП-42 + ВСДП-16	$y = -0,0607x + 20,01$	0,93	330	9686
8		$y = -0,1087x + 19,454$	0,96	179	2801
9		$y = -0,0969x + 13,908$	0,97	144	1681
10	Сплав ЖС32	$y = -0,2196x + 1,4922$	0,98	—	—

По совокупности результатов определения продолжительности достижения нулевого привеса и прогноза расчетной продолжительности до полного разрушения покрытия лучшую жаростойкость при температуре 1150 °С имеет покрытие 4 состава СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²).

Заключения

Проведены испытания на изотермическую жаростойкость образцов из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с двухслойными конденсационно-диффузионными покрытиями из никелевых сплавов ВСДП-3, СДП-2, СДП-42 и алюминиевого сплава ВСДП-16 при температуре 1150 °С на базе 400 ч. Показано, что при толщинах никелевых сплавов 20–80 мкм и привесе алюминиевого сплава 10–40 г/м² все покрытия независимо от состава обеспечивают защиту сплава от высокотемпературного окисления на заданной базе испытаний.

С использованием электронных таблиц в пакете программ Excel получены аналитические линейные зависимости изменения удельной массы образцов с покрытиями от продолжительности испытаний в диапазоне 30–400 ч. По результатам определения продолжительности достижения нулевого привеса образцов с покрытиями и прогноза расчетной продолжительности до полного разрушения покрытия лучшую жаростойкость при температуре 1150 °С имеет покрытие состава СДП-42 (80 мкм) + ВСДП-16 (40 г/м²).

Список источников

1. Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // Энциклопедия инженера-химика. 2012. № 5. С. 34–41.
2. Мубояджян С.А. Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. № 3. С. 26–30.
3. 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.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия для лопаток компрессора газотурбинных двигателей // Электрометаллургия. 2016. № 10. С. 23–38.
5. Александров Д.А., Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Журавлева П.Л. Упрочнение поверхности титановых сплавов методом ионной имплантации и ионного модифицирования // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
6. Добрынин Д.А., Павлова Т.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Алексеева М.С. Использование электролитно-плазменной обработки для ремонта лопаток ГТД // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-18-26.
7. Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация. № 2009139016; заявл. 22.10.09; опубл. 20.11.10.
8. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем Gd₂O₃-ZrO₂-HfO₂ и Sm₂O₃-Y₂O₃-HfO₂ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
9. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 71–81.
10. Мубояджян С.А., Каблов Е.Н. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 149–163.

11. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
12. Александров Д.А. Исследование износостойких покрытий на основе многокомпонентных нитридов титана // *Труды ВИАМ*. 2020. № 4–5 (88). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-62-69.
13. Способ защиты лопаток газовых турбин: пат. 2404286 Рос. Федерация № 2009139016; заявл. 22.10.2009; опубл. 20.11.2010.
14. Способ нанесения защитных покрытий и устройство для его осуществления пат. 2625698 Рос. Федерация №2016135082; заявл. 29.08.16; опубл. 18.07.17.
15. Будиновский С.А., Ляпин А.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С., Татарников С.В. Нанесение многослойного антифреттингового покрытия на крупногабаритные изделия // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
16. Будиновский С.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С. Нанесение защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали на установках типа МАП // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
17. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Защита поверхности внутренней полости монокристаллических лопаток турбины ГТД из современных безуглеродистых жаропрочных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2008. № 3. С. 12–17.
18. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // *Наука и жизнь*. 2009. № 10. С. 6–10.
19. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники*. М.: ВИАМ, 2015. С. 3.
20. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Исследование влияния барьерного слоя на жаростойкость защитного покрытия для лопаток ТВД из сплава ЖС32 // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1 (49). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-2-2.

References

1. Muboyadzhyan S.A. Industrial ion-plasma equipment for applying protective coatings. *Entsiklopediya inzhenera-khimika*, 2012, no. 5, pp. 34–41.
2. Muboyadzhyan S.A. Protective coatings for parts of the hot path of gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2011, no. 3, pp. 26–30.
3. 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 tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Erosion-resistant coatings for compressor blades of gas turbine engines. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 10, pp. 23–38.
5. Aleksandrov D.A., Muboyadzhyan S.A., Lutsenko A.N., Zhuravleva P.L. Hardening of the surface of titanium alloys by ion implantation method and ionic modification. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 33–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-33-39.
6. Dobrynin D.A., Pavlova T.V., Afanasyev-Khodykin A.N., Alekseeva M.S. The use of electrolytic-plasma treatment for repair of GTE blades. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-18-26.
7. *Way of protection of blades of gas turbines*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
8. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ and $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.

9. Muboyadzhyan S.A., Aleksandrov D.A., Gorlov D.S., Egorova L.P., Bulavinceva E.E. Protective and strengthening ion-plasma coverings for blades and other responsible details of the GTE compressor. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 71–81.
10. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Ion etching and surface modification of critical machine parts in vacuum-arc plasma. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyenie*, 2011, no. SP2, pp. 149–163.
11. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
12. Aleksandrov D.A. The research of wear-resistant coatings based on multicomponent titanium nitrides. *Trudy VIAM*, 2020, no. 4–5 (88), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-45-62-69.
13. *Method of protecting gas turbine blades*: pat. 2404286 Rus. Federation; appl. 22.10.09; publ. 20.11.10.
14. *Method for applying protective coatings and a device for its implementation*: pat. 2625698 Rus. Federation; appl. 29.08.16; publ. 18.07.17.
15. Budinovskiy S.A., Lyapin A.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S., Tatarnikov S.V. Multilayer antifretting coating on large-sized manufactures. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-98-107.
16. Budinovskiy S.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S. Deposition of protective ion-plasma coatings on largescale parts on MAP type installations. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
17. Muboyadzhyan S.A., Galoyan A.G. Surface protection of internal cavity of single-crystal turbine blades of GTE from modern carbon-free hot strength alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2008, no. 3, pp. 12–17.
18. Kablov E.N. Science as a branch of the economy. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 10, pp. 6–10.
19. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Thermal protective coatings with a ceramic layer of reduced thermal conductivity based on zirconium oxide for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Modern achievements in the field of creating advanced non-metallic composite materials and coatings for aviation and space technology*. Moscow: VIAM, 2015, p. 3.
20. Smirnov A.A., Budinovskiy S.A. Investigation of the effect of the barrier layer on heat-resistant protective coating for turbine blades from ZhS32 alloy. *Trudy VIAM*, 2017, no. 1 (49), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-2-2.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Будиновский Сергей Александрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Бенклян Артем Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Татарников Сергей Владимирович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Sergey A. Budinovskiy, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Artem S. Benklyan, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Sergey V. Tatarnikov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.06.2024.
 The article was submitted 06.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.06.2024.

Научная статья

УДК 629.7.023.222

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76

СОХРАНЯЕМОСТЬ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И МИКРОМИЦЕТОВ-ДЕСТРУКТОРОВ

А.А. Кривушина¹, А.М. Коган¹, В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Исследована сохраняемость свойств лакокрасочных покрытий марок ЭП-140 и ВЭ-69 после проведения ускоренных климатических лабораторных испытаний и испытаний на грибостойкость с применением микромицетов, выделенных в трех климатических зонах: умеренный климат, умеренно теплый климат и сухой субтропический климат. Отмечено, что адгезионные свойства покрытий ВЭ-69 и ЭП-140 после проведения ускоренных климатических испытаний и воздействия микромицетов из трех климатических зон не меняются. Выявлены изменения декоративных свойств, отмечены изменения таких показателей, как блеск и цвет.

Ключевые слова: биоповреждения, лакокрасочные покрытия, микроорганизмы-деструкторы, микробиологическая стойкость, микробиологические повреждения, микромицеты, полимерные материалы, эмали

Для цитирования: Кривушина А.А., Коган А.М., Старцев В.О. Сохраняемость свойств лакокрасочных покрытий после воздействия климатических факторов и микромицетов-деструкторов // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.

Scientific article

PRESERVATION OF THE PROPERTIES OF PAINT COATINGS AFTER EXPOSURE TO CLIMATIC FACTORS AND MICROMYCETES-DESTRUCTORS

A.A. Krivushina¹, A.M. Kogan¹, V.O. Startsev¹

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

Abstract. The properties of coatings EP-140 and VE-69 were studied for the stability after conducting accelerated laboratory climatic tests and fungal resistance tests. Micromycetes isolated in three climatic zones were used: temperate climate, warm temperate climate and dry subtropical climate. It is noted that the adhesive properties of coatings VE-69 and EP-140 do not change after accelerated climatic tests and exposure to micromycetes from three climatic zones. Changes in decorative properties were revealed. Changes in indicators such as gloss and color were noted.

Keywords: biodeterioration, paint coatings, degrading microorganisms, microbiological resistance, microbiological damage, micromycetes, polymeric materials, enamels

For citation: Krivushina A.A., Kogan A.M., Startsev V.O. Preservation of the properties of paint coatings after exposure to climatic factors and micromycetes-destructors. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.

Введение

Полимерные материалы, в частности лакокрасочные покрытия (ЛКП), во время эксплуатации находятся под постоянным влиянием ряда факторов: климатических, биологических и др. Микробиологические повреждения широкой номенклатуры ЛКП отмечены повсеместно в различных климатических районах. Причина данного явления – жизнедеятельность на поверхности материалов микроорганизмов, в особенности микроскопических плесневых грибов, или микромицетов. Биоповреждения ЛКП можно различить невооруженным глазом, как правило, они выявляются в виде окрашенных пятен или налетов на поверхности. Если же наблюдается более активное развитие микромицетов на поверхности ЛКП, то обнаруживаются бугры, небольшие дыры, трещины и другие изменения, ухудшающие внешний вид изделия [1].

Довольно часто негативное воздействие жизнедеятельности микромицетов дополняется еще и другими внешними факторами окружающей среды. К ним относятся следующие климатические факторы: влияние ультрафиолетового излучения, перепады температур, влажности и т. п. В настоящее время активно ведутся работы по изучению влияния внешних климатических факторов [2–6] и развитию новых методов их исследования по отношению к ЛКП [7–10]. Помимо исследования влияния на ЛКП факторов климата, проводятся работы по изучению способности и активности новых штаммов микроорганизмов вызывать микробиологические повреждения [11–19].

Цель данной работы – изучение изменения свойств – адгезионной прочности, значений блеска, параметров цвета – эмалей марок ЭП-140 и ВЭ-69 после серий климатических лабораторных испытаний, а также исследование грибостойкости с применением микроскопических грибов, выделенных в трех климатических зонах: умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата.

Материалы и методы

Работу проводили на образцах эмалей ЭП-140 и ВЭ-69 с серым и красным пигментами, как и на предыдущих этапах работы [20]. Проведены лабораторные климатические испытания для оценки влияния последовательного воздействия факторов климата на адгезионную прочность, параметры блеска и цвета образцов. На рис. 1 приведена схема испытаний по трем режимам воздействия.

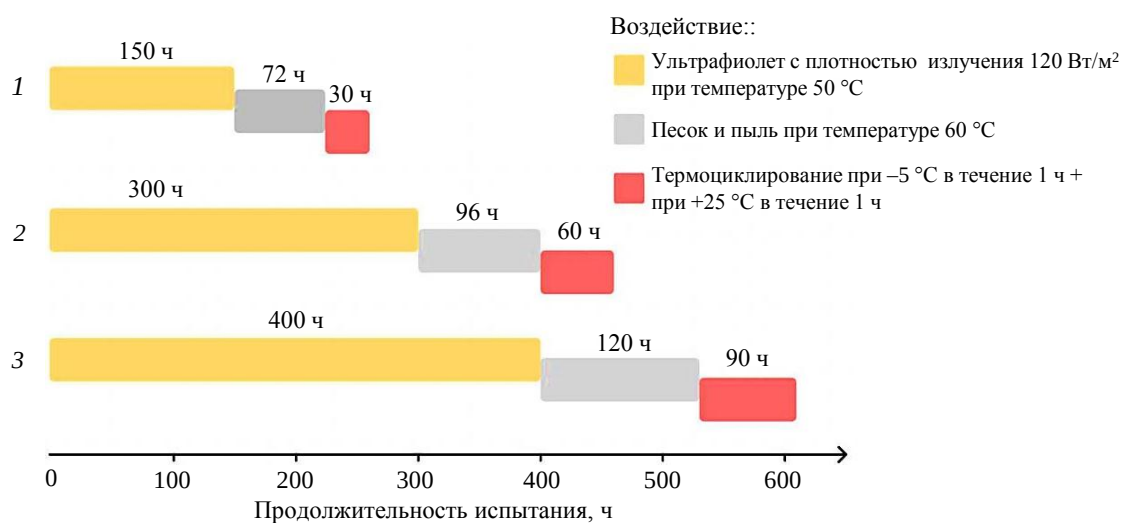


Рис. 1. Схема проведения ускоренных климатических испытаний по режимам 1–3 при различных параметрах воздействия

Далее проведены испытания на воздействие микроорганизмов, выделенных в трех климатических зонах. Полный список видов грибов, применяемых в эксперименте, приведен в таблице. Штаммы микромицетов из группы МЦКИ и ГЦКИ выделены на предыдущих этапах работы с образцов материалов в естественных условиях умеренного (г. Москва) и умеренно теплого климата (г. Геленджик) соответственно. Штаммы микромицетов из группы «Иран» взяты из депозитария НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, выбраны штаммы видов, характерные для сухого субтропического климата. Штаммы поддерживались в коллекции с использованием методов криоконсервации и лиофилизации, которые позволяют сохранить физиологические свойства изучаемых штаммов в течение длительного срока хранения [21].

Список видов микромицетов, применяемых в исследовании

Группа грибов	Условный номер штамма	Вид гриба
МЦКИ	viam193	<i>Purpureocillium takamizusanense</i>
	viam194	<i>Aspergillus flavus</i>
	viam195	<i>Aspergillus niger</i>
	viam196	<i>Aspergillus terreus</i>
	viam197	<i>Aspergillus puulaauensis</i>
ГЦКИ	viam138	<i>Alternaria alternata</i>
	viam139	<i>Arthrimum phaeospermum</i>
	viam144	<i>Fusarium oxysporum</i>
	viam142	<i>Penicillium oxalicum</i>
	viam143	<i>Talaromyces rugulosus</i>
	viam144	<i>Penicillium rugulosum</i>
«Иран»	viam64	<i>Ulocladium botrytis</i>
	viam65	<i>Curvularia spicifera</i>
	viam66	<i>Aspergillus niger</i>
	viam67	<i>Aspergillus flavus</i>
	viam68	<i>Fusarium incarnatum</i>

Исследование влияния микромицетов на сохраняемость свойств эмалей проводили в соответствии с ГОСТ 9.049–91, метод 1. Образцы покрытий обрабатывали в отдельности суспензией спор грибов определенной группы (МЦКИ, ГЦКИ, «Иран»). Для этого споры микроскопических грибов в водном растворе в виде суспензии с помощью пульверизатора наносили на всю поверхность образцов ЛКП. Образцы материалов после обработки экспонировали в специальных климатических камерах, поддерживающих определенный температурный и влажностный режим во время всего эксперимента: температура 29 ± 2 °C и относительная влажность воздуха >90 %. После окончания экспонирования образцы материалов осматривали на предмет присутствия на поверхности мицелия и спороношений микромицетов с применением бинокулярного микроскопа. Оценку грибостойкости проводили по шестибалльной шкале ГОСТ 9.048–89 в зависимости от степени развития микромицетов на поверхности покрытий.

По окончании исследований на грибостойкость проводили оценку свойств ЛКП по следующим методикам: определение блеска (ГОСТ 31975–2013) и цвета (цветового различия) эмалей (ГОСТ Р 52490–2005).

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

Результаты и обсуждение

Сначала проведены ускоренные климатические лабораторные испытания образцов эмалей. Изменение цветовых характеристик покрытий связано с выцветанием

пигмента под действием солнечного излучения, а снижение показателей блеска – с выветриванием поверхности образцов под действием песчано-воздушной смеси. Существенный скачок изменения параметра цветового различия (ΔE) наблюдается после воздействия песка и пыли. В среднем воздействие ультрафиолетового излучения вызвало изменение параметра ΔE на 5–15 %, песка и пыли – на 70–90 %, термоциклирования – на 5–10 %. Изменение блеска и цвета являются первичными сигналами деструкции поверхности эмали.

Далее проведены испытания на воздействие микроорганизмов, выделенных в трех климатических зонах: умеренном, умеренно теплом и сухом субтропическом климате.

В группу МЦКИ входят пять штаммов микроскопических грибов, среди которых четыре вида рода *Aspergillus*, такие как *flavus*, *niger* и *terreus*. Эти виды являются известными деструкторами различных типов материалов, в том числе полимерных [22], поэтому их тест-культуры применяются для испытаний неметаллических материалов и изделий на грибостойкость в лабораторных условиях. Еще один гриб из данной группы – это представитель рода *Purpureocillium*, который встречается в различных местах обитания, обладает довольно высокой устойчивостью к изменениям температурного режима и pH, а также может быть контаминантом различных материалов и изделий.

В группу ГЦКИ входят шесть штаммов микромицетов разных видов, из которых наиболее известные деструкторы и контаминанты – это представители родов *Alternaria*, *Fusarium*, *Penicillium*. Вид *Alternaria alternata* – известный сапротрофный вид микромицетов, который способен разлагать различные сложные углеводороды. Неоднократно представители этого вида встречались на полимерных покрытиях, но они способны вызывать микробиологические повреждения и других полимерных материалов. Представители вида *Fusarium oxysporum* также отмечены на неметаллических материалах и способны инициировать микробиологические повреждения [22]. Представители вида *Penicillium oxalicum* и *rugulosum* встречаются на широкой номенклатуре различных полимеров в разных районах и обладают широкими возможностями адаптации к разным субстратам. Вид *Talaromyces rugulosus* является синонимом вида *Penicillium rugulosum*.

В группу «Иран» входит пять штаммов микромицетов разных видов, из которых наиболее известные деструкторы и контаминанты – это представители родов *Aspergillus*, *Fusarium*, *Ulocladium*. Штаммы видов *Aspergillus flavus* и *niger* также относятся и к первой группе микромицетов умеренного климата. Как уже отмечено ранее, это очень распространенные грибы с известной деструктивной активностью. Вид *Ulocladium botrytis* довольно распространенный, он встречается в почве и различных помещениях. Иногда колонии этого вида ошибочно принимают за представителей рода *Alternaria* из-за морфологического сходства. Вид *Ulocladium botrytis* является экстремофильным организмом, способен выживать в ксерофильных экосистемах и щелочно-известковых почвах, а также в ассоциации с древесными видами *Scutia buxifolia* [23]. Вид *Fusarium incarnatum* широко распространен в тропических регионах, встречается в почве, чаще всего известен как патоген сельскохозяйственных культур [24]. Представители вида *Curvularia spicifera* наиболее часто известны как сапротрофы на растениях, а также паразиты ряда растительных культур [25, 26].

По результатам микробиологических испытаний отмечено активное развитие (4–5 баллов по ГОСТ 9.048–89) микромицетов всех трех групп (МЦКИ, ГЦКИ, «Иран») на всех образцах эмалей. Проверка адгезионных свойств эмалей ВЭ-69 и ЭП-140 после испытаний на грибостойкость с применением культур грибов из трех климатических зон и ускоренных климатических испытаний изменений не выявила.

Изменение цвета поверхности эмалей после ускоренных климатических испытаний и микробиологического воздействия приведено на диаграммах на рис. 2–5. Видно, что для эмали ВЭ-69 с красным пигментом наблюдаются большие изменения цвета, чем для той же марки эмали, но с серым пигментом. Наибольшее значение цветового различия для эмали ВЭ-69 с красным пигментом отмечено после воздействия режима 3 климатических лабораторных испытаний и микромицетов группы «Иран» (6 усл. ед.), после режима 2 и воздействия микромицетов группы МЦКИ (5,6 усл. ед.). Для серой эмали ВЭ-69 самые большие показатели изменения цвета отмечаются после режима 3 климатических лабораторных испытаний и микромицетов группы МЦКИ (4 усл. ед.). Если сравнивать по интенсивности воздействия группы микромицетов из разных зон, то в большинстве случаев отмечается наибольшее влияние на показатель цвета микромицетов из группы МЦКИ, т. е. для грибов умеренного климата. Как видно из диаграмм на рис. 2–5, в пяти случаях из шести развитие грибов умеренного климата на поверхности образцов после лабораторных климатических испытаний оказало самое большое воздействие на изменение цвета: при режимах 1 и 2 для красной эмали ВЭ-69 и при всех трех режимах для серой эмали ВЭ-69.

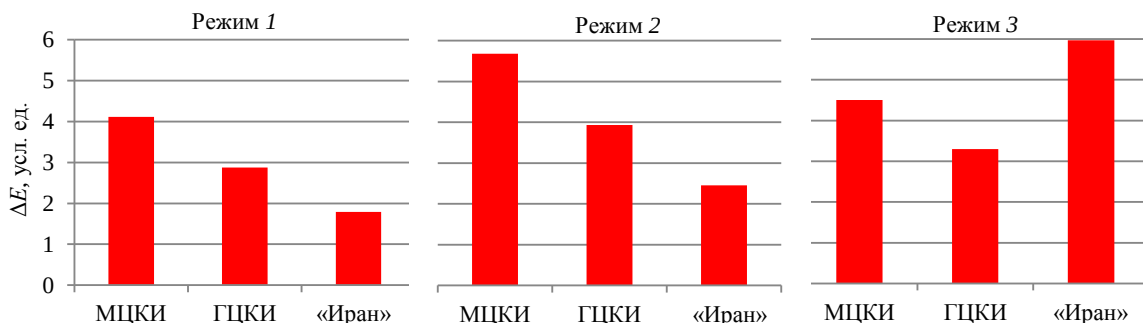


Рис. 2. Цветовое различие ΔE лакокрасочного покрытия ВЭ-69 с красным пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

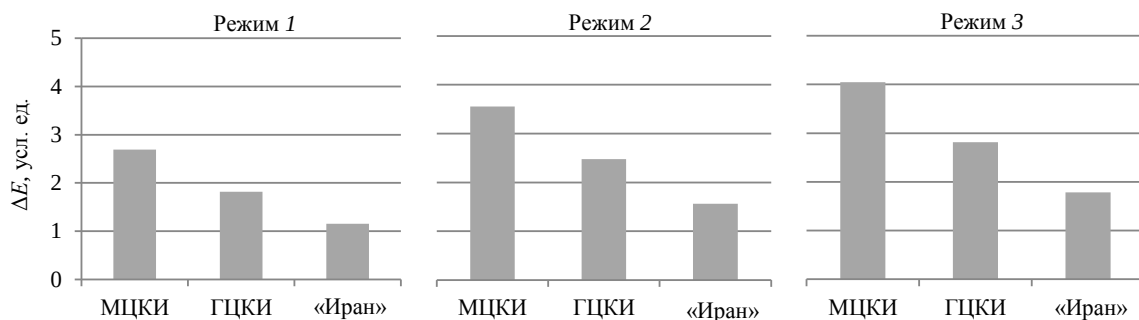


Рис. 3. Цветовое различие ΔE лакокрасочного покрытия ВЭ-69 с серым пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

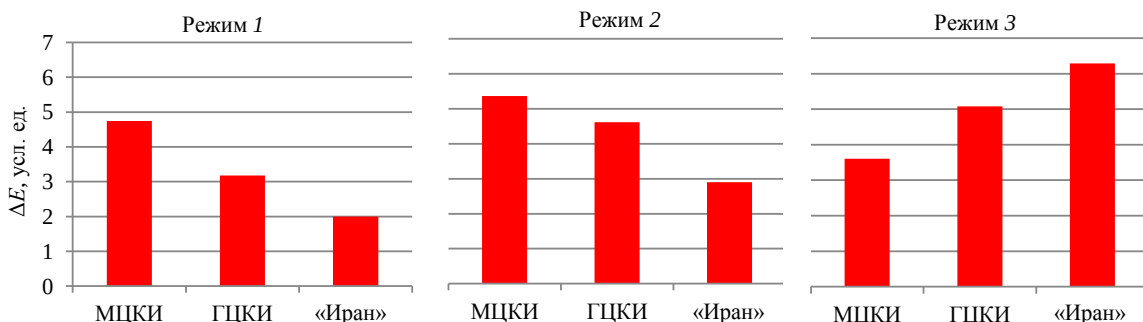


Рис. 4. Цветовое различие ΔE лакокрасочного покрытия ЭП-140 с красным пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

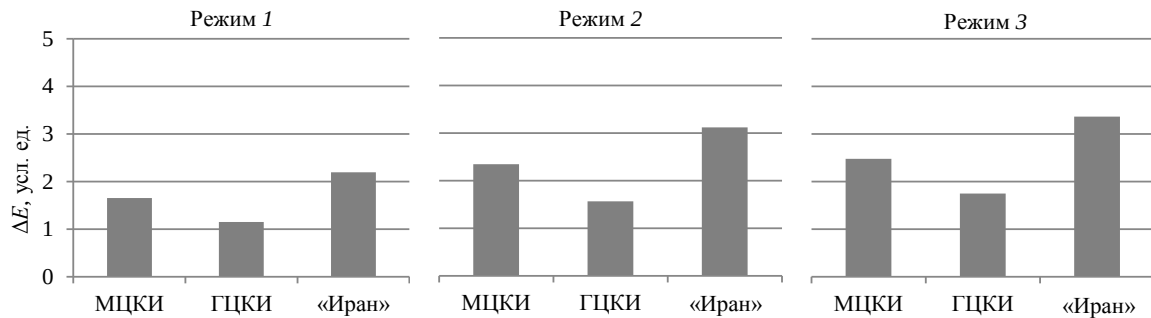


Рис. 5. Цветовое различие ΔE лакокрасочного покрытия ЭП-140 с серым пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

Далее для красной эмали ЭП-140 также наблюдаются большие изменения цвета, чем для этой же марки эмали, но содержащей серый пигмент. Наибольшее значение цветового различия для красной эмали ЭП-140 отмечено после воздействия режима 3 климатических лабораторных испытаний и микромицетов группы «Иран» (6,3 усл. ед.), после режима 2 и воздействия микромицетов группы МЦКИ (5,4 усл. ед.). Для серого покрытия ЭП-140 самое большое изменение цвета отмечается после режимов 2 и 3 и микромицетов группы «Иран» (3,2–3,4 усл. ед.). Что касается сравнения интенсивности воздействия групп микромицетов из разных климатических зон, то в случае покрытия ЭП-140 можно выделить две группы микромицетов, оказавших наибольшее воздействие на показатель изменения цвета – это микромицеты групп МЦКИ и «Иран», т. е. микромицеты умеренного и сухого субтропического климата. В случае красной эмали ЭП-140 наблюдается самое большое воздействие на цвет грибов умеренного климата после режимов 1 и 2, грибов сухого субтропического климата после режима 3. Для образцов серого покрытия ЭП-140 отмечается самое большое изменение цвета после воздействия грибов сухого субтропического климата после всех трех режимов.

Изменение блеска образцов ЛКП после воздействия климатических факторов и микромицетов трех групп приведено на диаграммах на рис. 6–9. Видно, что для красной эмали ВЭ-69 изменения по показателю блеска незначительно различаются между собой при воздействии микроскопических грибов всех трех групп. Величина изменений больше связана с режимом климатических испытаний – так, самые большие изменения блеска отмечены для режима 3 (48–53 %), чуть меньше для режима 2 (40–45 %), наименьшие значения – для режима 1 (25–30 %). Для серой эмали ВЭ-69, напротив, изменения блеска больше отличаются после испытаний на грибостойкость с применением трех групп микроскопических грибов, но более-менее схожи по значениям при трех режимах ускоренных климатических испытаний. Самые большие изменения блеска отмечены после воздействия грибов группы «Иран» (30–44 %), после воздействия микромицетов групп МЦКИ и ГЦКИ значения изменения блеска приблизительно одинаковые: около 20 % – после режимов 1 и 2, 30–33 % – после режима 3.

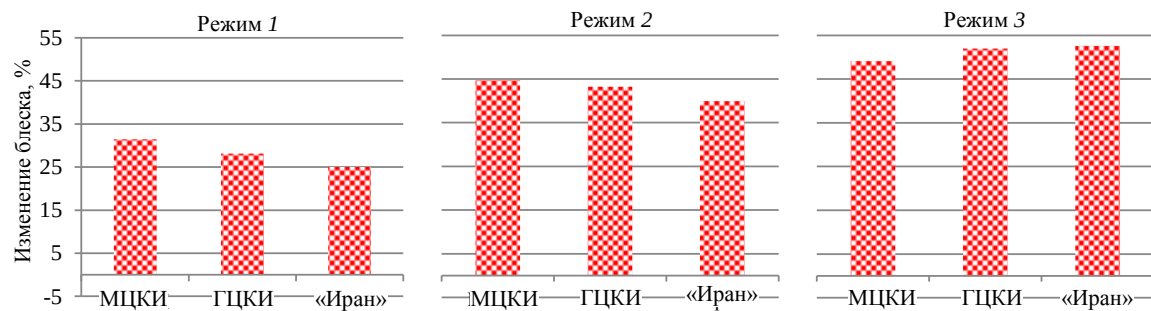


Рис. 6. Изменение блеска лакокрасочного покрытия ВЭ-69 с красным пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

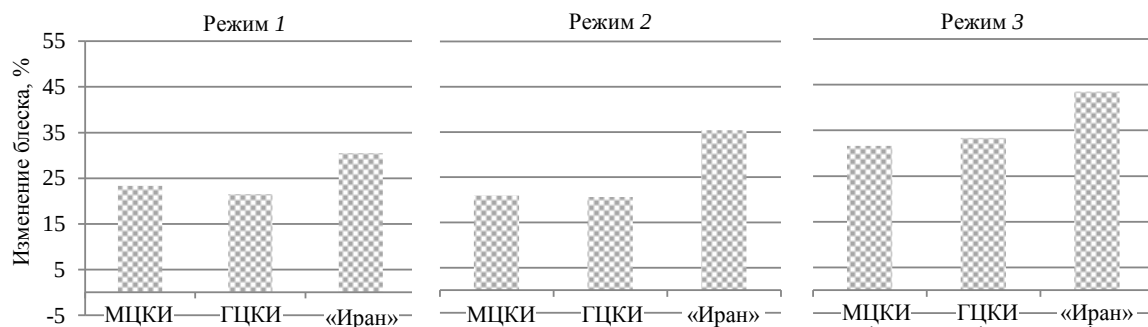


Рис. 7. Изменение блеска лакокрасочного покрытия ВЭ-69 с серым пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

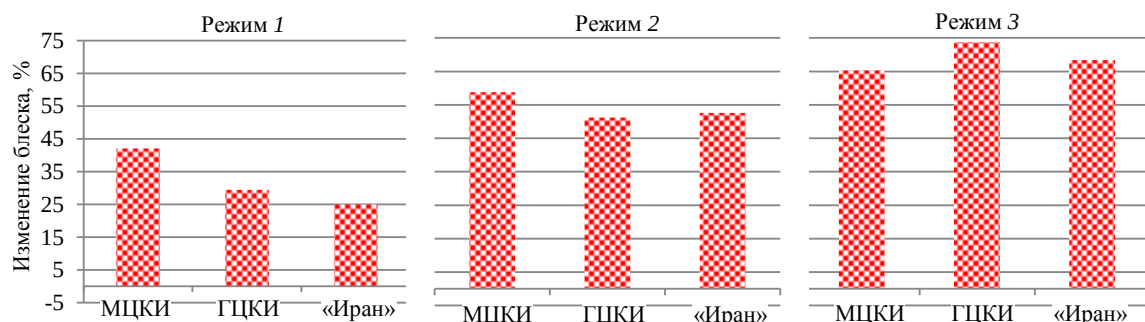


Рис. 8. Изменение блеска лакокрасочного покрытия ЭП-140 с красным пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

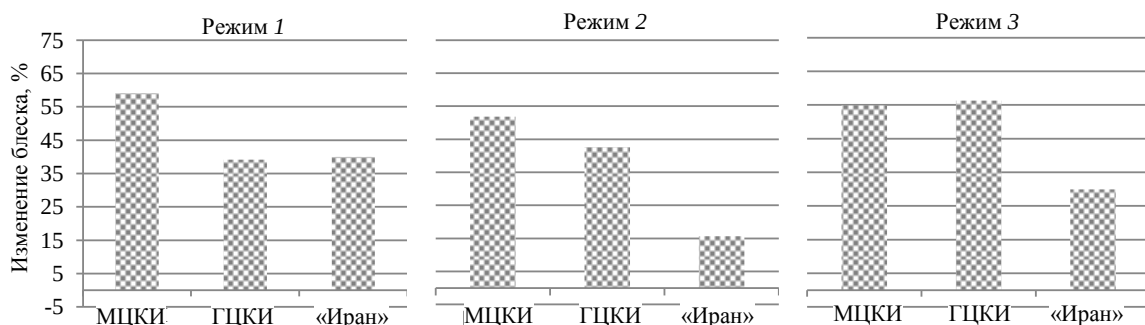


Рис. 9. Изменение блеска лакокрасочного покрытия ЭП-140 с серым пигментом после воздействия климатических факторов и микромицетов из трех климатических зон

Большие изменения показателя блеска отмечены для эмали ЭП-140 в сравнении с предыдущей маркой эмали – ВЭ-69. Так, для красной эмали ЭП-140 эти показатели находятся в диапазоне от 25 до 73 %. Наибольшие значения отмечены после режима 3 (65–73 %), разница между воздействием трех разных групп микромицетов не очень существенная. Для режима 2 показатель изменения блеска находится в диапазоне от 50 до 60 %, разница между воздействием трех разных групп микромицетов также не очень существенная. Для режима 1 показатель изменения блеска находится в диапазоне от 25 до 40 %, при этом самые большие изменения отмечены под воздействием микроскопических грибов группы МЦКИ. Для серой эмали ЭП-140 показатели изменения находятся в диапазоне от 15 до 58 %. Для режима 1 показатель изменения блеска – от 40 до 58 %, при этом наибольшие изменения отмечены под воздействием микромицетов группы МЦКИ. Для режима 2 показатель изменения блеска находится в диапазоне от 15 до 50 %, наибольшие изменения также отмечены после испытаний на грибостойкость с применением микроскопических грибов группы МЦКИ. Для режима 3 показатель изменения блеска – от 30 до 56 %.

Заключения

Исследована сохраняемость свойств эмалей типа ЭП-140 и ВЭ-69 с серым и красным пигментами после серии климатических лабораторных испытаний с последующим определением грибостойкости с применением микроскопических грибов, выделенных в зонах умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата. Показано, что такой показатель ЛКП, как адгезия эмалей ВЭ-69 и ЭП-140, после проведения ускоренных климатических испытаний и воздействия грибов каждой из трех климатических зон не меняются. Показаны изменения таких свойств, как блеск и цвет. По анализу совокупности полученных данных можно сделать вывод, что наиболее стойкой к воздействию внешних климатических факторов является фторполиуретановая эмаль серого цвета, менее стойкой – эпоксидная эмаль красного цвета, что соответствует наиболее существенному цветовому различию у испытанных образцов. Аналогичный вывод можно сделать по изменению блеска.

Показано, что для красных эмалей ВЭ-69 и ЭП-140 наблюдаются большие изменения цвета, чем для тех же марок, но с серым пигментом. Наиболее значимые изменения цвета эмали ВЭ-69 также отмечены после воздействия микроскопических грибов в умеренном климате. Для эмали ЭП-140 можно выделить две группы микромицетов, оказавших самое большое воздействие на показатель изменения цвета – это микромицеты в умеренном и сухом субтропическом климате. Большие значения изменения блеска отмечены для образцов эмали ЭП-140 в сравнении с образцами эмали ВЭ-69. Изменения по показателю блеска незначительно различаются между собой для испытанных эмалей при воздействии микромицетов из трех климатических зон. Величина изменений блеска больше связана с режимом ускоренных климатических испытаний, предшествующих испытаниям на грибостойкость – наибольшие показатели отмечены для режима 3.

За время проведения испытаний (как ускоренных климатических, так и испытаний на грибостойкость) не выявлено коррозионных повреждений на образцах серых и красных эмалей марок ВЭ-69 и ЭП-140, что свидетельствует о стойкости покрытий на основе данных эмалей на предварительно загрунтованной алюминиевой подложке к влиянию микромицетов и климатических факторов.

Список источников

1. Полякова А.В., Кривушина А.А., Горяшник Ю.С., Бухарев Г.М. Испытания на микробиологическую стойкость в натурных условиях различных климатических зон // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-11-11.
2. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Материалы для освоения Арктики и холодных территорий // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 21.
3. 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.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
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: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3. С. 16–19.

7. Батраев И.С., Рыбин Д.К., Иванюк К.В., Ульяницкий В.Ю., Штерцер А.А. Износостойкие детонационные покрытия на основе карбида вольфрама для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтового слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
9. Железняк В.Г., Сердцелюбова А.С., Меркулова Ю.И., Скирко П.В. Система лакокрасочных покрытий на основе полиуретановой эмали для защиты лобовых обогреваемых поверхностей изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
10. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натуральных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
11. Rojas T.I., Aira M.J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba) // Grana. 2012. Vol. 51. Is. 1. P. 44–51.
12. Попихина Е.А., Трепова Е.С. Микодеструкторы строительных материалов // Тез. докл. Четвертого съезда микологов России «Современная микология в России»: в 7 т. М.: Национальная академия микологии, 2017. Т. 6. С. 424–426.
13. Огаркова Г.Р., Буковская Н.Е., Самусенок Л.В., Огарков Б.Н. Биоповреждения пористых строительных материалов ассоциациями специфичных микроорганизмов // Тез. докл. Третьего съезда микологов России «Современная микология в России»: в 3 т. М.: Национальная академия микологии, 2012. Т. 3. С. 224–225.
14. Балюта А.А., Важинская И.С. Стойкость современных строительных материалов к плесневому поражению // Тез. докл. Третьего съезда микологов России «Современная микология в России»: в 3 т. М.: Национальная академия микологии, 2012. Т. 3. С. 210.
15. Катаев А.Д., Кураков А.В. Микробная колонизация и деструкция биоразлагаемых синтетических материалов на основе полигидроксипропириата и полигидроксипалмита в почвах // Тез. докл. третьего съезда микологов России «Современная микология в России»: в 3 т. М.: Национальная академия микологии, 2012. Т. 3. С. 218–219.
16. Гончарова И.А., Сабадаха Е.Н., Тригубович А.М., Черная Н.В. Микологический анализ промышленных материалов, контаминированных микроскопическими грибами // Труды БГТУ. Сер.: 2.2020. № 2. С. 163–168.
17. Смоляницкая О.Л. Микромицеты как потенциальные агенты биоповреждения культурных ценностей и стратегия защиты от них в Государственном Эрмитаже: автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб., 2007. 26 с.
18. Севастьянов Д.В., Сутубалов И.В., Дасковский М.И., Шеин Е.А. Полимерные биоконкомпозиты на основе биоразлагаемых связующих, армированных натуральными волокнами (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.
19. Горяева А.Г., Великова Т.Д., Добрусина С.А. Микобиота воздуха и композитов бумаги с полимерными покрытиями в Российской национальной библиотеке // Микология и фитопатология. 2010. № 44 (1). С. 10–18.
20. Антипов В.В., Кривушина А.А., Старцев В.О., Коган А.М. Исследование свойств лакокрасочных покрытий после воздействия микромицетов умеренного и умеренно теплого климата // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-130-141.
21. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Яковенко Т.В., Николаев Е.В. Методы хранения микроорганизмов-деструкторов в коллекции ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-89-94.
22. Лугаускас А.Ю., Микульскене А.И., Шляужене Д.Ю. Каталог микромицетов – биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. С. 258–259.

23. Saparrat M.C.N., Arambarri A.M., Balatti P.A. Growth response and extracellular enzyme activity of *Ulocladium botrytis* LPSC 813 cultured on carboxy-methylcellulose under a pH range // *Biology and Fertility of soils*. 2007. Vol. 44. P. 383–386. DOI: 10.1007/s00374-007-0217-7.
24. Lu Y., Qiu J., Wang S. et al. Species diversity and toxigenic potential of *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex isolates from rice and soybean in China // *Plant Disease*. 2021. Vol. 105. No. 9. P. 2628–2636. DOI: 10.1094/PDIS-09-20-1907-RE.
25. Пидопличко Н.М. Грибы-паразиты культурных растений: Определитель: в 3 т. Киев: Наукова думка, 1977. Т. 2. С. 140–142.
26. Manamgoda D.S., Cai L., McKenzie E.H.C. et al. A phylogenetic and taxonomic re-evaluation of the *Bipolaris* – *Cochliobolus* – *Curvularia* Complex // *Fungal Diversity*. 2012. Vol. 56. P. 131–144. DOI: 10.1007/s13225-012-0189-2.

References

1. Polyakova A.V., Krivushina A.A., Goryashnik Yu.S., Buharev G.M. Microbiological resistance tests under nature conditions in variety of climatic zones. *Trudy VIAM*, 2016, no. 4, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-11-11.
2. Buznik V.M., Kablov E.N. Materials for the development of the Arctic and cold territories. *Reports XXI Mendelev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 21.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendelev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. 2. New approaches to assessing the corrosivity of coastal atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
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: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.
6. Startsev O.V., Medvedev I.M., Kurs M.G. Hardness as the indicator of corrosion of aluminum alloys in sea conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 16–19.
7. Batraev I.S., Rybin D.K., Ivanyuk K.V., Ulianitsky V.Yu., Shtertser A.A. Wear resistant detonation coatings based on tungsten carbide for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-92-109.
8. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
9. Zheleznyak V.G., Serdcelyubova A.S., Merkulova Yu.I., Skivko P.V. Paint coating system based on polyurethane enamel for protecting heated frontal surfaces of aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-120-128.
10. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
11. Rojas T.I., Aira M.J., Batista A. et al. Fungal biodeterioration in historic buildings of Havana (Cuba). *Grana*, 2012, vol. 51, is. 1, pp. 44–51.
12. Popikhina E.A., Trepova E.S. Microdestructors of building materials. *Reports Fourth Congress of Russian Mycologists «Modern Mycology in Russia»*: in 7 vols. Moscow: National Academy of Mycology, 2017, vol. 6, pp. 424–426.
13. Ogarkova G.R., Bukovskaya N.E., Samusenok L.V., Ogarkov B.N. Biodamage of porous building materials by associations of specific microorganisms. *Reports Third Congress of Russian Mycologists «Modern Mycology in Russia»*: in 3 vols. Moscow: National Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 224–225.

14. Balyuta A.A., Vazhinskaya I.S. Resistance of modern building materials to mold damage. *Reports Third Congress of Russian Mycologists «Modern Mycology in Russia»*: in 3 vols. Moscow: National Academy of Mycology, 2012, vol. 3, p. 210.
15. Kataev A.D., Kurakov A.V. Microbial colonization and destruction of biodegradable synthetic materials based on polyhydroxybutyrate and polyhydroxyvalerate in soils. *Reports Third Congress of Russian Mycologists «Modern Mycology in Russia»*: in 3 vols. Moscow: National Academy of Mycology, 2012, vol. 3, pp. 218–219.
16. Goncharova I.A., Sabadakha E.N., Trigubovich A.M., Chernaya N.V. Mycological analysis of industrial materials contaminated with microscopic fungi. *Trudy BGTU. Ser.: 2*, 2020, no. 2, pp. 163–168.
17. Smolyanitskaya O.L. *Micromycetes as potential agents of biodamage to cultural property and a strategy for protecting against them in the State Hermitage*: thesis abstracts, Cand. Sc. (Bio.). St. Petersburg, 2007, 26 p.
18. Sevastyanov D.V., Sutubalov I.V., Daskovskij M.I., Shein E.A. Polymer biocomposites based on biodegradable binders reinforced by natural fibers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 42–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-42-50.
19. Goryaeva A.G., Velikova T.D., Dobrusina S.A. Mycobiota of air and paper composites with polymer coatings in the Russian National Library. *Mikologiya i fitopatologiya*, 2010, no. 44 (1), pp. 10–18.
20. Antipov V.V., Krivushina A.A., Startsev V.O., Kogan A.M. Study of the paint coatings properties after impact of micromycetes in a moderate and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-130-141.
21. Krivushina A.A., Bobyрева T.V., Yakovenko T.V., Nikolaev E.V. Methods of microorganisms-destructors storage in FSUE «VIAM» collection (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 89–94. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-3-89-94.
22. Lugauskas A.Yu., Mikulskienė A.I., Shlauzhenė D.Yu. *Catalog of micromycetes – biodestructors of polymer materials*. Moscow: Nauka, 1987, pp. 258–259.
23. Saparrat M.C.N., Arambarri A.M., Balatti P.A. Growth response and extracellular enzyme activity of *Ulocladium botrytis* LPSC 813 cultured on carboxy-methylcellulose under a pH range. *Biology and Fertility of soils*, 2007, vol. 44, pp. 383–386. DOI: 10.1007/s00374-007-0217-7.
24. Lu Y., Qiu J., Wang S. et al. Species diversity and toxigenic potential of *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex isolates from rice and soybean in China. *Plant Disease*, 2021, vol. 105, no. 9, pp. 2628–2636. DOI: 10.1094/PDIS-09-20-1907-RE.
25. Pidoplichko N.M. *Fungi-parasites of cultivated plants: Key*: in 3 vols. Kyiv: Naukova Dumka, 1977, vol. 2, pp. 140–142.
26. Manamgoda D.S., Cai L., McKenzie E.H.C. et al. A phylogenetic and taxonomic re-evaluation of the *Bipolaris – Cochliobolus – Curvularia* Complex. *Fungal Diversity*, 2012, vol. 56, pp. 131–144. DOI: 10.1007/s13225-012-0189-2.

Информация об авторах

Кривушина Анастасия Александровна, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коган Алексей Маркович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anastasia A. Krivushina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey M. Kogan, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.06.2024.
The article was submitted 31.05.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.06.2024.

Научная статья

УДК 620.1:678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-1212 ПОСЛЕ ЭКСПОНИРОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

О.В. Старцев¹, А.А. Скирта¹, В.О. Старцев¹, Е.О. Валевин¹, Е.В. Двирная¹

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

Аннотация. Проведены сравнительные испытания стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 на старение в умеренно теплом климате г. Геленджика и влажных тропиках г. Ваньнин. Обнаружено снижение прочности стеклопластика при изгибе и сдвиге. Снижение уровня механических показателей, измеренных при температуре 120 °С, оказалось значительнее, чем при комнатной температуре. Предел прочности при сжатии углепластика ВКУ-39 стабилен после 3 лет экспонирования в обеих климатических зонах. Для стеклопластика ВПС-48/7781 снижение предела прочности при сжатии после 3 лет старения составило 11% в г. Геленджике, 26 % – г. Ваньнин.

Ключевые слова: стеклопластик, углепластик, старение, прочность, пластификация, термическое расширение, температура стеклования, деструкция

Для цитирования: Старцев О.В., Скирта А.А., Старцев В.О., Валевин Е.О., Двирная Е.В. Сравнение свойств углепластиков и стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212 после экспонирования в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

Scientific article

COMPARISON OF THE PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS AND GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS BASED ON THE VSE-1212 BINDER AFTER EXPOSURE TO DIFFERENT CLIMATIC ZONES

O.V. Startsev¹, A.A. Skirta¹, V.O. Startsev¹, E.O. Valevin¹, E.V. Dvirnaya¹

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

Abstract. Comparative tests of fiberglass VPS-48/7781 and carbon fiber plastic VKU-39 for aging were carried out in the moderately warm climate of Gelendzhik and the humid tropics of Vanning. A decrease in the strength of fiberglass during bending and shear was discovered. The decrease in mechanical properties measured at 120 °C was greater than at room temperature. The compressive strength of VKU-39 carbon fiber plastic is stable after 3 years of exposure in both climatic zones. For fiberglass VPS-48/7781, the decrease in compressive strength was 11% after 3 years of aging in Gelendzhik and 26% after 3 years in Vanning.

Keywords: fiberglass, carbon fiber, aging, strength, plasticization, thermal expansion, glass transition temperature, destruction

For citation: Startsev O.V., Skirta A.A., Startsev V.O., Valevin E.O., Dvirnaya E.V. Comparison of the properties of carbon fiber reinforced plastics and glass fiber reinforced plastics based on the VSE-1212 binder after exposure to different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-77-92.

Введение

Общепризнанными причинами изменения механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ) в открытых климатических условиях являются воздействия температуры, влажности и солнечного излучения [1, 2]. Широкое использование угле- и стеклопластиков в элементах внешнего контура авиационной техники [3, 4] требует новых исследований климатического старения ПКМ, в том числе определения коэффициентов сохранения

$$k_R = R/R_0,$$

где R_0 и R – пределы прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s) материалов в исходном состоянии и после климатических воздействий различной продолжительности соответственно [5].

Температура как фактор старения способствует доотверждению и релаксации исходной структурной неоднородности [2, 6] эпоксидных матриц ПКМ. Например, при нагреве полиэфирного стеклопластика в течение 1 ч при температурах 100, 150 и 200 °С показатель σ_t изменяется на 88–106 % [7]. После 3 мес. нагрева углепластика ВКУ-59 при температуре 60 °С и относительной влажности $\phi = 85$ % показатель σ_c уменьшается на 15 % [8]. При солнечном освещении в летние дни образцы нагреваются до температуры 40–60 °С [9], вызывая снижение относительной влажности воздуха на поверхности до 20 % [10, 11].

Если экспонировать ПКМ в сухом климате [12], то при незначительном влиянии атмосферной влаги прочность, рельеф поверхности и твердость материалов не изменяются. Поэтому для определения устойчивости к внешним воздействиям обычно изучают поведение ПКМ в термовлажностных условиях [13–16].

При повышении температуры активность воздействия влаги возрастает. По данным работы [13], квазиизотропный углепластик при комнатной температуре поглощает 1,2 % влаги, показатель σ_c уменьшается на 4 %. При температуре 70 °С количество сорбированной влаги w возрастает до 1,6 % с соответствующим уменьшением σ_c на 11 %. Аналогичным образом [14] пултрузионные углепластиковые стержни на основе эпоксидной матрицы и волокна Т700 после выдержки в воде при температурах 40, 60 и 80 °С в течение 1 года поглотили от 0,36 до 0,61 % воды. Вода оказала пластифицирующее воздействие, понизив температуру стеклования T_g (с 203 до 175 °С) и показатель σ_s (с 73 до 54 МПа).

Коэффициенты сохранения k_R зависят от показателя R при механических испытаниях ПКМ [5]. Так, в работе [15] эпоксидный стеклопластик выдерживали в воде при температурах 25, 40 и 70 °С в течение 60 сут. За это время сорбировалось 1,3–1,4 % воды, показатели σ_t , σ_c и σ_b снизились на 32, 13 и 27 % соответственно. Подобным образом показатели R углепластика Т300/Epicote RIMR 135 после 35 сут выдержки в морской воде при температуре 60 °С уменьшились на 17–38 % [16]. Аналогичные результаты получены в работах [17–20] при исследованиях термовлажностного старения ПКМ.

Термовлажностные испытания позволяют сравнить стабильность показателей R различных материалов. Однако наиболее достоверные выводы об эксплуатационной стойкости ПКМ можно получить только при проведении натурных климатических испытаний [5, 21–23]. Экспериментально установлено, что коэффициенты сохранения после нескольких лет экспонирования в различных климатических зонах могут уменьшиться до $k_R = 0,6$ [5].

Перспективными материалами авиационного назначения признаны угле- и стеклопластики на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212 [24]. Связующее состоит

из модифицированной дифункциональной эпоксидной смолы, полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя, термопласта [25] и обеспечивает комплекс необходимых деформационно-прочностных показателей в материалах, предназначенных для обшивки и деталей внешнего контура самолетов и вертолетов. В работе [26] рассмотрено влияние углеродных и стеклянных наполнителей различных производителей на показатели R . В зависимости от свойств наполнителей показатели R для ПКМ различаются на 10–20 %, а для некоторых составов – даже на 30 %.

По данным работы [27], коэффициенты сохранения k_R углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 снижаются после термостарения на 25 и 19 % соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Влияние климатического старения при температуре 120 °С на прочностные показатели углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 [27]

Наполнитель	Продолжительность старения, лет	σ_c , МПа	σ_c/σ_{c0}	σ_b , МПа	σ_b/σ_{b0}	σ_s , МПа	σ_s/σ_{s0}
Углеродная ткань арт. 3692	0	810/710	1,00/1,00	1130/920	1,00/1,00	96/67	1,00/1,00
	0,23	865/755	1,07/1,06	1130/920	1,00/1,00	100/67	1,04/1,00
	0,46	840/640	1,04/0,90	1180/955	1,04/1,04	76/55	0,79/0,82
	0,68	930/740	1,15/1,04	1125/855	1,00/0,93	73/50	0,76/0,75
	0,91	845/630	1,04/0,89	1160/935	1,03/1,02	73/56	0,76/0,84
	1,14	730/540	0,90/0,76	1150/985	1,02/1,07	80/58	0,83/0,87
Стеклоткань арт. 7781	0	640/460	1,00/1,00	640/540	1,00/1,00	95/59	1,00/1,00
	0,23	635/435	0,99/0,95	620/570	0,97/1,06	95/63	1,00/1,07
	0,46	520/415	0,81/0,90	610/560	0,95/1,04	71/53	0,74/0,90
	0,68	600/450	0,94/0,98	660/565	1,03/1,05	68/48	0,72/0,81
	0,91	575/425	0,90/0,92	670/545	1,05/1,01	75/59	0,79/1,00
	1,14	530/380	0,83/0,83	670/510	1,05/0,94	77/53	0,81/0,90

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. Для сравнения указаны значения коэффициентов сохранения $k_R = R/R_0$.

Механические показатели углепластика ВКУ-39 на основе углеродной ткани арт. 3692 после 3 мес. теплового и термовлажностного старения, пребывания в камере солевого тумана не изменились. Однако показатели σ_b и σ_s уменьшились на 10–20 % после выдержки в воде [28].

Состав наполнителей также влияет на климатическую стойкость ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212, что подтверждают результаты работ [29–32] (табл. 2).

После 1 года пребывания углепластика на основе ткани арт. 3692 в различных климатических зонах России значения σ_c и σ_b уменьшаются на 10–15 % [29]. Однако после 3 лет эти показатели снижаются на 20 % [30]. В другой серии испытаний [31] отмечено устойчивое возрастание этих показателей после экспонирования в восьми климатических зонах. Стеклопластик на основе ткани арт. 7781 также оказался стабильным [29], однако после 3 лет климатических испытаний отмечены случаи уменьшения показателей σ_c и σ_b на 40 % [30].

Отметим, что увеличение продолжительности экспонирования в г. Геленджике до 6,25 лет углепластика ВКУ-25, армированного однонаправленным жгутовым наполнителем марки 12k E-23, вызвало уменьшение значений σ_b на 36–39 % [33].

**Влияние климатического старения на прочностные показатели углепластиков
и стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-1212**

Место старения	Наполнитель	Продолжи- тельность старения, лет	σ_c , МПа	σ_c/σ_{c0}	σ_b , МПа	σ_b/σ_{b0}	Литератур- ный источ- ник
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	720/540	1,00/1,00	1000/760	1,00/1,00	[29]
Москва		1	648/502	0,90/0,93	830/707	0,83/0,93	
Геленджик			691/491	0,96/0,91	930/661	0,93/0,87	
Сочи			720/594	1,00/1,10	910/661	0,91/0,87	
Якутск			662/529	0,92/0,98	850/654	0,85/0,86	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	630/460	1,00/1,00	580/530	1,00/1,00	
Москва		1	580/451	0,92/0,98	568/530	0,98/1,00	
Геленджик			611/428	0,97/0,93	539/509	0,93/0,96	
Сочи			599/451	0,95/0,98	563/461	0,97/0,87	
Якутск			643/451	1,02/0,98	580/498	1,00/0,94	
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	740/570	1,00/1,00	920/840	1,00/1,00	[30]
Москва		1	651/536	0,88/0,94	984/823	1,07/0,98	
		3	622/490	0,84/0,86	911/739	0,99/0,88	
		1	636/507	0,86/0,89	1003/840	1,09/1,00	
Геленджик		3	614/456	0,83/0,80	902/689	0,98/0,82	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	590/480	1,00/1,00	680/480	1,00/1,00	
Москва		1	407/384	0,69/0,80	612/422	0,90/0,88	
		3	384/288	0,65/0,60	510/336	0,75/0,70	
		1	401/379	0,68/0,79	612/403	0,90/0,84	
Геленджик		3	384/278	0,65/0,58	469/302	0,69/0,63	
В исходном состоянии	Углеродная ткань арт. 3692	0	743/536	1,00/1,00	936/688	1,00/1,00	[31]
Геленджик		3	810/552	1,09/1,03	1095/798	1,17/1,16	
Поселок Даль- ние Зеленцы			780/574	1,05/1,07	1039/743	1,11/1,08	
Звенигород			788/574	1,06/1,07	1048/771	1,12/1,12	
Москва			840/552	1,13/1,03	1067/736	1,14/1,07	
Сочи			825/541	1,11/1,01	1048/743	1,12/1,08	
Якутск			802/574	1,08/1,07	1133/819	1,21/1,19	
Владивосток			765/515	1,03/0,96	1048/688	1,12/1,00	
Сьенфуэгос			780/584	1,05/1,09	1095/826	1,17/1,20	
В исходном состоянии	Стеклоткань арт. 7781	0	620/430	1,00/1,00	580/490	1,00/1,00	[32]
Геленджик		3	682/439	1,10/1,02	690/392	1,19/0,80	
Поселок Даль- ние Зеленцы			651/460	1,05/1,07	650/431	1,12/0,88	
Звенигород			651/460	1,05/1,07	708/392	1,22/0,80	
Москва			707/434	1,14/1,01	673/421	1,16/0,86	
Сочи			694/439	1,12/1,02	708/421	1,22/0,86	
Якутск			676/469	1,09/1,09	713/441	1,23/0,90	

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. Для сравнения указаны значения коэффициентов сохранения $k_R = R/R_0$.

Таким образом, стабильность механических показателей ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212 в климатических условиях зависит от типа и свойств наполнителей,

места и продолжительности испытаний, температуры измерения показателей R . Актуальной задачей остается сравнение стабильности ПКМ на основе связующего ВСЭ-1212 при экспонировании в типовой зоне России и при повышенной климатической агрессивности. Хорошим вариантом для такого сравнения являются испытания в умеренно теплом климате г. Геленджика и тропическом климате г. Ваньнин (КНР), как это проделано для серии авиационных герметиков в работе [34]. Такие сравнительные климатические испытания углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 на основе связующего ВСЭ-1212 являются целью данной работы.

Материалы и методы

Для сравнительных испытаний состояния связующего ВСЭ-1212 в ПКМ использованы разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластик ВКУ-39 и стеклопластик ВПС-48/7781, предназначенные для изготовления силовых элементов авиационной техники, которые подвергаются внешним климатическим и эксплуатационным воздействиям. Наполнителями выбраны равнопрочная углеродная ткань ВТКУ-2.200 и стеклоткань арт. 7781, свойства которых рассмотрены в работах [26, 35]. Предварительные исследования этих материалов показали высокий уровень деформационно-прочностных показателей [26–28] и способность противостоять открытому климатическому воздействию [29–32].

Пластины из углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-48/7781 экспонировали в течение 1 года и 3 лет на открытых стендах в г. Геленджике и г. Ваньнин (КНР) аналогично испытаниям герметиков [34]. Среднегодовые климатические показатели мест испытаний хорошо охарактеризованы и представлены в работах [36–38]. При выборе мест испытаний учтено, что значения годовой суммарной солнечной радиации на побережье Черного [36] и Южно-Китайского морей [37, 38] соизмеримы (4826 и 4960 МДж/м²), но г. Ваньнин превосходит г. Геленджик по среднегодовой температуре (26,4 и 15,5 °С), а также относительной влажности воздуха (78 и 69 %).

Прочностные показатели ПКМ определены стандартными методами при комнатной и повышенной (120 °С) температурах: при сжатии – по ГОСТ 25.602–80, сдвиге – ГОСТ 32659–2014, изгибе – ГОСТ 25.604–82. Рельеф поверхности композитов исследовали с помощью конфокального сканирующего микроскопа при увеличениях $\times 50$ и $\times 500$ с площадью полей зрения 1920×2560 и 192×256 мкм соответственно. С целью удаления шумов компьютерную обработку профилей проводили с применением программы по требованиям ГОСТ Р ИСО 4287–2014 [39] аналогично работе [40]. Содержание влаги в образцах определяли титрованием по методу Фишера в соответствии с ГОСТ 11736–78. Для исследования кинетики влагопереноса использовали образцы размером 50×50 мм. Предварительно высушенные исходные и экспонированные образцы выдерживали при относительной влажности воздуха 98 ± 2 % и температуре 60 °С в течение 30–40 сут. В течение этого времени измеряли массу образцов на аналитических весах с чувствительностью 10^{-4} г. Термическое расширение $\Delta H = H - H_0$, относительное термическое расширение $\Delta H/H_0$ и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) α измеряли в направлении, перпендикулярном плоскости армирования, на термомеханическом анализаторе в интервале температур от 20 до 220 °С [27]. Здесь H – толщина образца, измеренная в интервале температур от 20 до 220 °С, H_0 – толщина образца в начале измерений. Температуру стеклования T_g полимерной матрицы определяли по излому температурной зависимости $\Delta H/H_0$ при переходе связующего ВСЭ-1212 из стеклообразного в высокоэластическое состояние аналогично работам [27, 41].

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

Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены результаты измерения прочностных показателей R стекло- и углепластика в исходном состоянии, а также после 1 года и 3 лет испытаний в г. Геленджике и г. Ваньнин.

Подтверждается выявленная ранее закономерность, согласно которой старение ПКМ в наибольшей степени проявляется в снижении прочности при изгибе и сдвиге, особенно в тропическом климате [5]. Например, после 3 лет экспозиции в г. Геленджике показатель σ_s стеклопластика, измеренный при комнатной температуре, уменьшился на 13 %, а после аналогичного воздействия в г. Ваньнин – на 24 %. Для всех вариантов снижение показателей R , измеренных при температуре 120 °С, оказалось значительнее, чем при комнатной температуре.

Таблица 3

**Изменение свойств полимерных композиционных материалов
после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин**

Материал	Показатели	Значения показателей при экспонировании					
		в г. Геленджике			в г. Ваньнин		
		в исходном состоянии	в течение 1 года	в течение 3 лет	в исходном состоянии	в течение 1 года	в течение 3 лет
Стеклопластик ВПС-48/7781	σ_c , МПа	570/397	523/438	508/378	578/425	450/340	429/317
	σ_b , МПа	583/503	580/461	548/418	615/538	513/433	466/398
	σ_s , МПа	84/51	81/47	73/41	87/53	70/39	66/34
	r , мкм	1,0	11,0	25,0	1,4	18,0	32,9
	w , %	0,31	0,50	0,53	0,32	0,59	0,60
Углепластик ВКУ-39/ВТКУ-2.200	σ_c , МПа	682/518	678/534	642/501	636/477	586/470	616/369
	σ_b , МПа	742/646	722/584	680/550	736/690	698/478	634/578
	σ_s , МПа	68/48	64/46	67/38	62/45	66/40	61/34
	r , мкм	3,9	5,4	7,9	1,1	17,0	23,4
	w , %	0,36	0,52	0,42	0,53	0,90	0,95

Примечание. В числителе указаны показатели R (пределы прочности при сжатии (σ_c), изгибе (σ_b) и сдвиге (σ_s)), измеренные при комнатной температуре, в знаменателе – при температуре 120 °С. r – средний размах неоднородностей поверхности, w – количество сорбированной воды.

Показатель σ_c углепластика ВКУ-39 стабилен после 3 лет экспонирования в обеих климатических зонах. Для стеклопластика ВПС-48/7781 снижение показателя σ_c после 3 лет старения составило 11 % в г. Геленджике, 26 % – в г. Ваньнин.

В предыдущих работах [30–32] выявлена чувствительность показателей рельефа поверхности ПКМ к климатическому старению. Результаты исследования рельефа поверхности, полученные в данной работе, дают новые сведения о влиянии условий климатических испытаний на деструкцию связующего в поверхностном слое. На рис. 1 показано сравнение рельефа поверхности стеклопластика ВПС-48/7781 в зоне комплексной нити в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике и г. Ваньнин.

Размах неоднородностей поверхности r в стеклопластике возрастает с 1 до 25 мкм после 3 лет старения в умеренно теплом климате, до 32,9 мкм – в тропическом климате и оказывается значительнее, чем в углепластике (табл. 3). В работе [30] показано, что при увеличении значений r показатели R стеклопластика ВПС-48/7781 линейно уменьшаются. Таким образом, для климатически состаренных ПКМ справедливо соотношение

$$k_R = 1 - A_R r, \quad (1)$$

где k_R – коэффициент сохранения прочностного показателя R ; r – средний размах неоднородностей поверхности ПКМ; A_R – коэффициент пропорциональности, зависящий от показателя R .

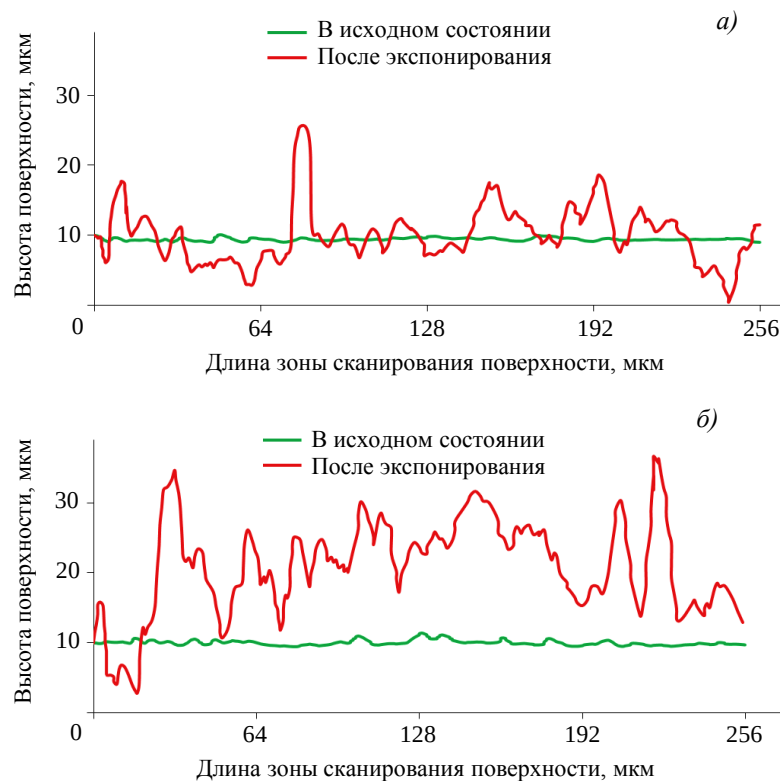


Рис. 1. Рельеф поверхности стеклопластика ВПС-48/7781 в зоне комплексной нити в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

Используя результаты измерений показателя r , указанные в табл. 3, по соотношению (1) вычислены коэффициенты A_R для исследованных ПКМ. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние условий экспонирования на коэффициенты пропорциональности A_R в соотношении (1) для пределов прочности при сжатии, изгибе и сдвиге, измеренных при комнатной и повышенной температурах, для стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39

Материал	Место экспонирования	Температура измерения, °C	$A_R \cdot 10^{-3}$, мкм ⁻¹ , для пределов прочности при			
			сжатии	изгибе	сдвиге	среднее
Стеклопластик ВПС-48/7781	г. Геленджик	20	4,4	5,4	5,2	5,0
		120	4,6	6,8	8,0	6,5
	г. Ваньнин	20	7,9	7,3	7,3	7,5
		120	8,6	7,9	11,0	9,2
Углепластик ВКУ-39	г. Геленджик	20	5,0	10,0	12,5	9,2
		120	6,8	19,0	26,1	17,3
	г. Ваньнин	20	5,0	6,4	13,3	8,2
		120	10,5	10,3	21,7	14,2

Для углепластика ВКУ-39 также выполняется соотношение (1). Средние значения A_R для стеклопластика ВПС-48/7781 увеличиваются в 1,5–2 раза при переходе от умеренно теплого к тропическому климату. При этом чувствительность показателей R к деструкции поверхности возрастает при повышении температуры измерений. Это следует из сравнения значений A_R , измеренных при температурах 20 и 120 °C.

Количество влаги w , сорбированной стекло- и углепластиком при экспонировании, изменяется в пределах от 0,31 до 0,95 % (табл. 3) и зависит от количества дождей, относительной влажности воздуха и перегрева поверхности при солнечном облучении пластин [11].

В работах [28–32] описано влияние влаги как пластификатора связующего ВСЭ-1212 в авиационных ПКМ. В данной работе роль влаги как значимого фактора старения стеклопластика ВПС-48/7781 и углепластика ВКУ-39 исследована методом термомеханического анализа.

Температурные зависимости относительного термического расширения $\Delta H/H_0$ высушенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике и г. Ваньнин представлены на рис. 2.

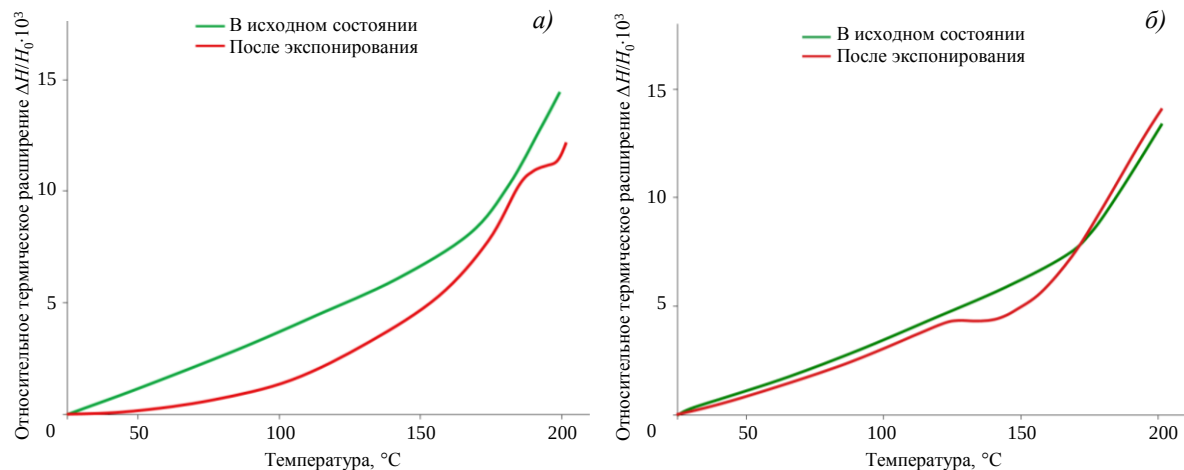


Рис. 2. Температурные зависимости относительного термического расширения высушенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

На зависимостях отчетливо выражены две области термического расширения связующего ВСЭ-1212. Для высушенных исходных образцов стеклопластика области стеклообразного состояния связующего соответствует монотонное (близкое к линейному) возрастание значений $\Delta H/H_0$ до температуры стеклования $T_g = 169^\circ\text{C}$ (рис. 2, а). Выше этой температуры наклон дилатометрической кривой возрастает из-за перехода эпоксидной матрицы в высокоэластическое состояние. С учетом зависимости $\Delta H/H_0$ от температуры вычислен КЛТР, величина которого при $T < T_g$ составила $58 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, при $T > T_g$ скачкообразно возросла до $145 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Полученные результаты соответствуют данным работ [27, 41].

Сравнение дилатометрических кривых на рис. 2, а показало, что в высушенных образцах стеклопластика после 3 лет климатического старения в г. Геленджике характер термического расширения перпендикулярно плоскости армирования остался практически неизменным. Подобные зависимости $\Delta H/H_0$ от температуры получены и для высушенных образцов, экспонированных в г. Ваньнин (рис. 2, б).

Примеры сопоставления дилатометрических кривых влагонасыщенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 показаны на рис. 3.

Характер зависимостей $\Delta H/H_0$ от температуры сохранился. Однако вследствие пластифицирующего воздействия влаги температура излома в исходных образцах снизилась до $T_g = 133 \pm 2^\circ\text{C}$, после 3 лет экспонирования – до $115 \pm 2^\circ\text{C}$. Для влагонасыщенных образцов выявилась еще одна особенность. В состаренных образцах переход связующего в высокоэластическое состояние изменился, стал протяженным, его начало соответствует температуре $95 \pm 2^\circ\text{C}$.

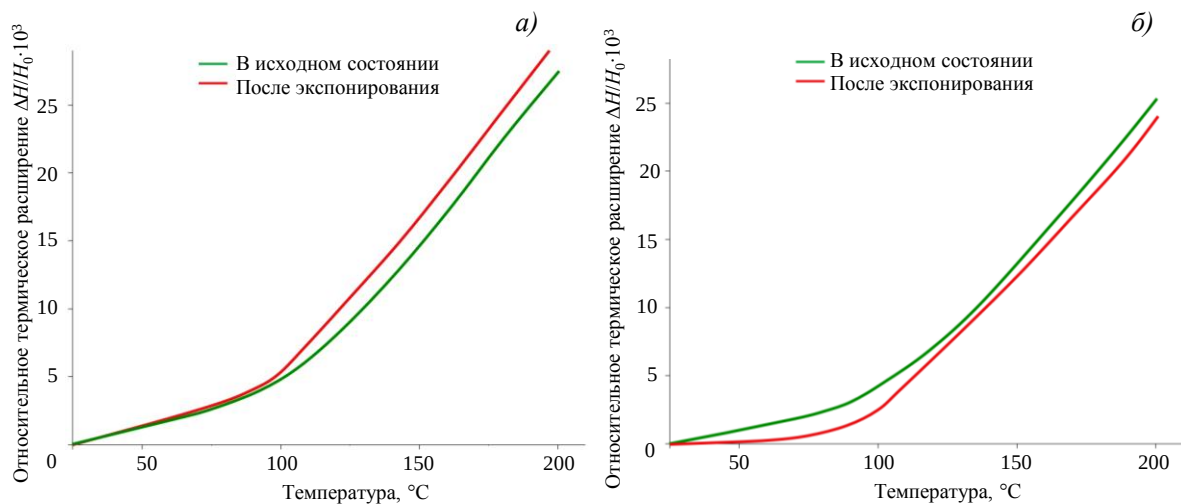


Рис. 3. Температурные зависимости относительного термического расширения влагонасыщенных образцов стеклопластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после 3 лет экспонирования в г. Геленджике (а) и г. Ваньнин (б)

Результаты обработки совокупности проведенных dilatометрических измерений представлены в табл. 5. Итогом трехлетнего климатического старения в г. Геленджике оказалось снижение T_g связующего ВСЭ-1212 на 6 °С в сухих образцах и на 17 °С во влагонасыщенных. Старение в г. Ваньнин усилило эффект: T_g сухих образцов снизилась на 14 °С, влагонасыщенных – на 20 °С. Эти сведения можно считать признаками деструкции эпоксидной матрицы. Можно предположить, что под воздействием климатических факторов образовались кинетические элементы, которые при взаимодействии с влагой приобрели способность к началу сегментальной подвижности при более низкой температуре 95 ± 2 °С.

Неизменность высокотемпературной границы перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние (185 ± 5 °С) можно считать косвенным признаком того, что климатические факторы за 3 года воздействия не повлияли на подвижность наиболее массивных или более упорядоченных сегментов эпоксидной матрицы.

Условия и продолжительность климатического воздействия не повлияли на величину КЛТР стеклопластика в стеклообразном состоянии связующего (табл. 5). Можно отметить тенденцию к уменьшению КЛТР при увеличении количества сорбированной влаги, объясняемую менее плотной молекулярной упаковкой элементов макроцепей, пластифицированных влагой. При переходе в высокоэластическое состояние влага десорбируется из объема образцов вследствие их нагрева, КЛТР стеклопластика при $T > T_g$ стабилизируется на уровне $(200 \pm 40) \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹. Термическое расширение связующего ВСЭ-1212 в углепластике показало те же закономерности, что и в стеклопластике. Наиболее важные результаты проведенного анализа показаны в табл. 6.

Температура стеклования T_g связующего ВСЭ-1212 высушенных исходных образцов в углепластике оказалась на 14–17 °С ниже, чем в стеклопластике. В таком недостаточно отвержденном связующем в условиях умеренно теплого климата процессы доотверждения преобладают над процессами деструкции, в результате чего после 3 лет экспонирования T_g сухих образцов возрастает на 5 °С (табл. 6). В тропическом климате в г. Ваньнин при той же продолжительности испытаний T_g уменьшается на 13 °С из-за преобладания деструкции.

Пластифицирующее действие влаги определяется разностью значений температуры стеклования в сухом и увлажненном состояниях ΔT_g . В исходном состоянии углепластика после предельного влагонасыщения ΔT_g связующего ВСЭ-1212 составила 63 °С (табл. 6). После 3 лет экспонирования в г. Геленджике ΔT_g достигла 56 °С, в г. Ваньнин: 38 °С. Таким образом, вследствие климатического старения пластифицирующее действие влаги ослабилось.

Как следует из данных табл. 6, КЛТР увлажненных образцов в стеклообразном состоянии эпоксидной матрицы возрастает с $36 \cdot 10^{-6}$ до $69 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Аналогичное увеличение КЛТР происходит и при переходе связующего ВСЭ-1212 в высокоэластическое состояние (табл. 5). Можно сделать вывод, что сорбированная влага, снижая температуру стеклования, позволяет достичь лучшей молекулярной упаковки сетчатого полимера в стеклообразном и высокоэластическом состояниях. Эта закономерность проявляется как в случае преобладания процессов доотверждения в г. Геленджике, так и при доминировании процессов деструкции в г. Ваньнин.

Термомеханический анализ, проведенный аналогично работе [12], позволил выявить влияние старения на начало и окончание перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние эпоксидной матрицы (табл. 4). В зависимости от условий и продолжительности экспонирования ширина данного релаксационного перехода изменяется от 25 до 40 °С.

Таблица 5

Температура стеклования и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) в стеклообразном состоянии и при переходе в высокоэластическое состояние эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 углепластика ВПС-48/7781 в исходном состоянии и после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, лет	Состояние стеклопластика	Температура стеклования T_g , °C			КЛТР: $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	
			начало	по излому	окончание	$T < T_g$	$T > T_g$
г. Геленджик	В исходном состоянии	После сушки	157	169	182	58	145
		Без сушки	151	160	180	49	140
		После увлажнения	88	132	185	48	250
г. Ваньнин		После сушки	164	170	186	50	138
		Без сушки	155	162	183	48	220
		После увлажнения	89	135	190	45	232
г. Геленджик	1	После сушки	143	155	190	36	182
		Без сушки	138	145	188	35	232
		После увлажнения	75	85/136	194	47	200
г. Ваньнин		После сушки	140	165	190	60	170
		Без сушки	115	128	189	53	217
		После увлажнения	70	87/140	191	47	200
г. Геленджик	3	После сушки	134	163	190	58	241
		Без сушки	116	132	190	53	236
		После увлажнения	85	97/115	190	58	243
г. Ваньнин		После сушки	143	156	185	49	200
		Без сушки	105	126	190	35	204
		После увлажнения	80	93/115	188	29	203

Таблица 6

**Температура стеклования и коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР)
в стеклообразном состоянии и при переходе в высокоэластическое состояние
эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 углепластика ВКУ-39 в исходном состоянии
и после натурной экспозиции в г. Геленджике и г. Ваньнин**

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, лет	Состояние углепластика	Температура стеклования T_g , °C			КЛТР: $\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	
			начало	по излому	окончание	$T < T_g$	$T > T_g$
г. Геленджик	В исходном состоянии	После сушки	145	155	183	36	110
		Без сушки	136	143	165	50	109
		После увлажнения	83	92	108	57	175
г. Ваньнин		После сушки	130	153	156	45	130
		Без сушки	115	134	151	53	136
		После увлажнения	85	90	102	69	157
г. Геленджик	1	После сушки	145	157	185	40	190
		Без сушки	131	137	160	45	190
		После увлажнения	85	93	110	55	193
г. Ваньнин		После сушки	133	146	160	41	162
		Без сушки	107	113	150	48	165
		После увлажнения	80	95	110	67	170
г. Геленджик	3	После сушки	143	160	183	44	195
		Без сушки	117	127	153	48	196
		После увлажнения	87	104	125	49	203
г. Ваньнин		После сушки	135	140	163	45	175
		Без сушки	124	125	145	49	210
		После увлажнения	75	102	115	56	220

Заключения

Выполненные исследования и сопоставление полученных результатов с данными аналогичных работ [27–32] позволяют сделать следующие выводы.

Изменения прочностных показателей после 1 года и 3 лет климатических испытаний характеризуют начальную стадию климатического старения эпоксидных стекло- и углепластиков. В течение этого времени основными причинами изменения прочностных показателей оказались необратимые процессы деструкции и доотверждения связующего, сочетающиеся с пластифицирующим влиянием влаги.

При высокой степени отверждения температура стеклования связующего ВСЭ-1212 составляет 190–220 °C. В этом состоянии связующего стекло- и углепластики в климатических условиях стабильны, а снижение их прочностных показателей зависит только от количества сорбированной влаги.

Температура стеклования связующего ВСЭ-1212 составила 170 °C в стеклопластике ВПС-48/7781 и 155 °C в углепластике ВКУ-39. Это указывает на неполное отверждение эпоксидной матрицы. В такой матрице при трехлетнем воздействии умеренно теплого климата преобладал процесс доотверждения, а в условиях влажных тропиков доминировала деструкция. Под воздействием этих превращений изменились прочностные показатели стекло- и углепластика, особенно при температуре измерений 120 °C. Полученные сведения о температуре стеклования эпоксидной матрицы можно использовать для оптимизации режима отверждения связующего ВСЭ-1212 аналогично подходу, представленному в работе [42].

Сорбированная влага уменьшила температуру стеклования связующего ВСЭ-1212 со 155–170 до 90 ± 5 °С и оказала влияние на величину КЛТР стекло- и углепластика в стеклообразном состоянии полимерной матрицы и при ее переходе в высокоэластическое состояние.

Полученные результаты расширяют возможности проведения комплексных оценок изменения свойств ПКМ при натурном экспонировании, выполненных ранее [43].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.

Список источников

1. Ageing of composites / ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 544 p.
2. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012. No. 4. P. 323–329.
3. Irving P., Soutis C. Polymer Composites in the Aerospace Industry. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2019. 688 p.
4. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
5. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Kychkin A.A., Lukachevskaya I.G., Lebedev M.P. The initial stage of climatic aging of basalt-reinforced and glass-reinforced plastics in extremely cold climates: regularities // Polymers. 2024. Vol. 16. Art. 866.
6. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites // Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics. 2011. Vol. 49. No. 24. P. 1695–1716.
7. Wu J., Zhang C. Modified Constitutive Models and Mechanical Properties of GFRP after High-Temperature Cooling // Buildings. 2024. Vol. 14. No. 2. Art. 439.
8. Старков А.И., Исаев А.Ю., Куцевич К.Е. Комплексная оценка воздействия эксплуатационных и климатических испытаний на изменение прочностных свойств полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов. Часть 1. Углепластик марки ВКУ-59 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.
9. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures // Polymer Degradation and Stability. 2009. Vol. 94. P. 189–195.
10. Burch D., Martin J., VanLandingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions // Journal of Coatings. 2002. Vol. 74. No. 1. P. 75–86.
11. Сальников В.Г. Исследование влагопоглощения авиационных углепластиков в условиях теплого влажного климата // Monitoring Systems of Environment. 2021. № 2. С. 46–53.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions // MOJ Polymer Science. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 18–24.
13. Behera A., Vishwakarma A., Thawre M.M., Ballal A. Effect of hygrothermal aging on static behavior of quasi-isotropic CFRP composite laminate // Composites Communications. 2020. Vol. 17. P. 51–55.
14. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment // Polymers. 2023. Vol. 15. No. 11. Art. 2490.
15. Cheng W., Cao Y. Strength degradation of GFRP cross-ply laminates in hydrothermal conditions // APL Materials. 2024. Vol. 12. No. 3. Art. 031113.
16. Attukur Nandagopal R., Gin Boay C., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material // Composite Structures. 2020. Vol. 236. Art. 111876.
17. 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. No. 3. Art. 614.
18. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // Journal of Composite Materials. 2022. Vol. 56. No. 14. P. 2189–2199.

19. Tao L., Min W., Qi L. et al. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature // *Polymer Degradation and Stability*. 2020. Vol. 182. Art. 109395.
20. Zhu R., Li X., Wu C. et al. Effect of Hydrothermal Environment on Mechanical Properties and Electrical Response Behavior of Continuous Carbon Fiber/Epoxy Composite Plates // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No. 19. Art. 4072.
21. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.*
22. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // *Пластические массы*. 2013. № 1. С. 37–41.
23. Евдокимов А.А. Полимерный композиционный материал, изготавливаемый по технологии вакуумной инфузии с формообразованием при температурах до 40 °С: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2022. 116 с.
24. 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: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов. М.: ВИАМ, 2021. 528 с.
26. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
27. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 3. Расчет энергии активации и теплового ресурса полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // *Труды ВИАМ*. 2016. № 5 (41). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
28. Мишуров К.С., Мишкин С.И. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-39 // *Труды ВИАМ*. 2016. № 12 (48). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
29. Николаев Е.В. Сохраняемость служебных характеристик полимерных композиционных материалов для мотогондолы авиационных двигателей при воздействии климатических и эксплуатационных факторов: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 123 с.
30. Старцев В.О., Славин А.В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
31. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Гуляев И.Н. Влияние климатических условий на углепластик ВКУ-39 после трех лет натурной экспозиции в восьми климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2023. № 8 (126). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.
32. Велигодский И.М., Коваль Т.В., Курносов А.О., Мараховский П.С. Исследование климатической стойкости образцов стеклопластика после натурной экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
33. Старцев В.О., Велевин Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
34. Старцев В.О., Велевин Е.О., Павлов М.Р., Скирта А.А. Исследование климатической стойкости тиоколовых и силиконовых герметиков // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2024. № 1. С. 24–31.
35. Сидорина А.И. Механические свойства полимерных композиционных материалов на основе российских высокопрочных углеродных наполнителей и полимерных матриц нового поколения // *Химические волокна*. 2018. № 2. С. 16–19.

36. Курс М.Г., Ветрова Е.Ю. Коррозионная агрессивность атмосферы и климатическая стойкость металлических материалов в различных регионах РФ // III Всерос. науч.-техн. конф. «Климат–2018. Вопросы прогнозирования коррозии, старения и биоповреждения материалов». Москва: ВИАМ, 2018. С. 128–143.
37. Zhang X., Liu M., Lu F. et al. Atmospheric Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy in Marine Environments // *Corrosion Science and Technology*. 2018. Vol. 17. No. 1. P. 6–11.
38. Zhang T., Zhang T., He Y. et al. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments // *Coatings*. 2021. Vol. 11. No. 2. Art. 237.
39. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
40. Kaplonek W., Nadolny K. Review of the advanced microscopy techniques used for diagnostics of grinding wheels with ceramic bond // *Journal of Machine Engineering*. 2012. Vol. 12. P. 81–98.
41. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirov Y.M., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
42. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
43. 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.

References

1. *Ageing of composites*. Ed. R. Martin. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008, 544 p.
2. Kablov E.N., Kirillov V.N., Startsev O.V., Krotov A.S. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 323–329.
3. Irving P., Soutis C. *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2019, 688 p.
4. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
5. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Kychkin A.A., Lukachevskaya I.G., Lebedev M.P. The initial stage of climatic aging of basalt-reinforced and glass-reinforced plastics in extremely cold climates: regularities. *Polymers*, 2024, vol. 16, art. 866.
6. Odegard G.M., Bandyopadhyay A. Physical aging of epoxy polymers and their composites. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2011, vol. 49, no. 24, pp. 1695–1716.
7. Wu J., Zhang C. Modified Constitutive Models and Mechanical Properties of GFRP after High-Temperature Cooling. *Buildings*, 2024, vol. 14, no. 2, art. 439.
8. Starkov A.I., Isaev A.Yu., Kutsevich K.E. Comprehensive assessment of the impact of operational and climatic tests on the change of strength properties of polymer composite materials based on adhesive prepregs. Part 1. Carbon fiber-reinforced plastic VKU-59. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-91-100.
9. Pickett J.E., Sargent J.R. Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, pp. 189–195.
10. Burch D., Martin J., VanLandingham M. Computer analysis of a polymer coating exposed to field weather conditions. *Journal of Coatings*, 2002, vol. 74, no. 1, pp. 75–86.
11. Сальников В.Г. Исследование влагопоглощения авиационных углепластиков в условиях теплого влажного климата. *Monitoring Systems of Environment*, 2021, no. 2, pp. 46–53.
12. Heinrich M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 18–24.
13. Behera A., Vishwakarma A., Thawre M.M., Ballal A. Effect of hygrothermal aging on static behavior of quasi-isotropic CFRP composite laminate. *Composites Communications*, 2020, vol. 17, pp. 51–55.

14. Liu X., Su Q., Zhu J., Song X. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 11, art. 2490.
15. Cheng W., Cao Y. Strength degradation of GFRP cross-ply laminates in hydrothermal conditions. *APL Materials*, 2024, vol. 12, no. 3, art. 031113.
16. Attukur Nandagopal R., Gin Boay C., Narasimalu S. An empirical model to predict the strength degradation of the hygrothermal aged CFRP material. *Composite Structures*, 2020, vol. 236, art. 111876.
17. 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, no. 3, art. 614.
18. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 2189–2199.
19. Tao L., Min W., Qi L. et al. The hygrothermal aging process and mechanism of CFRP papered by prepreg that may be stored at room temperature. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, vol. 182, art. 109395.
20. Zhu R., Li X., Wu C. et al. Effect of Hydrothermal Environment on Mechanical Properties and Electrical Response Behavior of Continuous Carbon Fiber/Epoxy Composite Plates. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 19, art. 4072.
21. *Aviation materials: a reference book in 13 vols.* Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2015, vol. 13: Climate and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
22. Kirillov V.N., Efimov V.A., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. Methodological features of conducting and processing the results of climatic tests of polymer composite materials. *Plasticheskie massy*, 2013, no. 1, pp. 37–41.
23. Evdokimov A.A. *Polymer compositional material made using vacuum infusion technology with molding at temperatures up to 40 °C*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2022, 116 p.
24. 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: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
25. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermoreactive binders for polymer composite materials*: textbook. Moscow: VIAM, 2021, 528 p.
26. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
27. Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., Pavlov M.R., Grashchenkov D.V. Comprehensive research of the influence of climatic and operational factors on new generation epoxy binding and polymeric composite materials on its basis. Part 3. Calculation of activation energy and thermal resource of polymeric composite materials on the basis of epoxy matrix. *Trudy VIAM*, 2016, no. 5 (41), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-11-11.
28. Mishurov K.S., Mishkin S.I. Environmental effect on properties of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) VKU-39. *Trudy VIAM*, 2016, no. 12 (48), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-8-8.
29. Nikolaev E.V. *The preservation of the official characteristics of polymer composite materials for the motorized motor motion engines under the influence of climatic and operational factors*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2016, 123 p.
30. Startsev V.O., Slavin A.V. Carbon and glass reinforced polymer based on solventfree binders resistance to the impact of a moderate cold and moderate warm climate. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-114-126.
31. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Gulyaev I.N. Influence of climatic conditions on CFRP VKU-39 after three year outdoor exposition in eight climatic zones. *Trudy VIAM*, 2023, no. 8 (126), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-113-128.

32. Veligodskiy I.M., Koval T.V., Kurnosov A.O., Marakhovskiy P.S. Study of resistance of glass fiber reinforced plastic to natural weathering in different climatic conditions. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-134-148.
33. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
34. Startsev V.O., Valevin E.O., Pavlov M.R., Skirt A.A. The study of the climatic resistance of thio-col and sulovsan sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2024, no. 1, pp. 24–31.
35. Sidorina A.I. The mechanical properties of polymer composite materials based on Russian high-strength carbon fillers and new generation polymer matrices. *Khimicheskie volokna*, 2018, no. 2, pp. 16–19.
36. Kurs M.G., Vetrova E.Yu. The corrosion aggressiveness of the atmosphere and the climatic resistance of metal materials in various regions of the Russian Federation. *III All-Rus. Sci-techn. Conf. «Climate-2018. Issues of predicting corrosion, aging and biopersion of materials»*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 128–143.
37. Zhang X., Liu M., Lu F. et al. Atmospheric Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy in Marine Environments. *Corrosion Science and Technology*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 6–11.
38. Zhang T., Zhang T., He Y. et al. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 237.
39. State Standard R ISO 4287–2014. *Geometric characteristics of products (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions and parameters of surface structure*. Moscow: Standinform, 2019, 20 p.
40. Kaplonek W., Nadolny K. Review of the advanced microscopy techniques used for diagnostics of grinding wheels with ceramic bond. *Journal of Machine Engineering*, 2012, vol. 12, pp. 81–98.
41. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirov Y.M., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
42. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
43. 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.

Информация об авторах

Старцев Олег Владимирович, старший научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скирта Александра Андреевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Старцев Валерий Олегович, начальник лаборатории, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Валевин Евгений Олегович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Двирная Елена Вячеславовна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg V. Startsev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexandra A. Skirta, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery O. Startsev, Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny O. Valevin, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena V. Dvirnaya, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.06.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.06.2024.
The article was submitted 18.06.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.06.2024.



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



SAFRAN
Snecma



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
www.viam.ru





ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА

ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ
(ЭПОКСИДНЫЕ, ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫЕ,
ЦИАНЭФИРНЫЕ, КРЕМНИЙОРГАНИ-
ЧЕСКИЕ, НЕОРГАНИЧЕСКИЕ,
КЕРАМООБРАЗУЮЩИЕ)
И КЛЕЕВ КОНСТРУКЦИОННОГО
И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Производственные
мощности

25 000 кг полимерных связующих
в год

3 000 кг клеев
в год

Ведется разработка новых современных связующих (полиимиды, бензоксазины, бисмалеинимиды).



Выпускаемые материалы применяются в различных изделиях авиационной техники.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- полимерные связующие: ВСЭ-20, ВСЭ-21, ВСЭ-28, ВСЭ-33, ВСЭ-34, ВСЭ-59, ВСЭ-62, ВСЭ-67, ВСЭ-68, ТКС, ФН, ЭДТ-69Н, ЭНФБ-2М, БМК-5, РСФ-250, ВС-51, ВСТ-1210, ВСТ-60;
- клеи: ВК-15, ВК-15М, ВК-18, ВК-20, ВК-20М, ВК-36, ВК-36РТ, ВК-36Р, ВК-53М, ВК-58, ВК-103, ВКП-11, ВКР-85, ВКР-86.

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
www.viam.ru



ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА
СОВРЕМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ИМПОРТНОГО
ПРОИЗВОДСТВА. РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР
И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ТЕХНОЛОГИЙ НАНЕСЕНИЯ СИСТЕМ
ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Производственные мощности

70 000 кг в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- эмали: ВЭ-46, ВЭ-46К, ВЭ-62, ВЭ-65М, ВЭ-69, КО-856, КО-5189, ЭП-140, ФП-566 и пр.;
- грунтовки: ЭП-0181, ЭП-0215, ВГ-27, ЭП-0214, ВГ-28, ВГ-36, ВГ-37, КО-0170 и пр.;
- шпатлевки: ЭП-0065, ВШ-17М, грунт - шпатлёвка ВШ-20, КО-0035, КО-0066, КО-0067, КО-0070 и пр.;
- лаки: АК-113, ВЛ-18, ВЛ-21, ФП-5182;
- прочие материалы: паста ВП-1, состав ПСП-2М, состав КСП-2, смывка ВСС-1;
- всего более 100 наименований.

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
www.viam.ru

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**ПОСТОЯННЫЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ МАГНИТЫ
СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–Co–В С РАЗЛИЧНЫМ
УРОВНЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО
КОЭФФИЦИЕНТА ИНДУКЦИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ
С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ,
А ТАКЖЕ БЛИЗКИМ К НУЛЮ.
КОЛЬЦЕВЫЕ МАГНИТЫ
С РАДИАЛЬНОЙ ТЕКСТУРОЙ.
ЛИТЫЕ МАГНИТЫ НА ОСНОВЕ
Fe–Al–Ni–Co**



НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – единственный производитель термостабильных
кольцевых магнитов с радиальной текстурой системы Pr–Dy–Fe–Co–В.

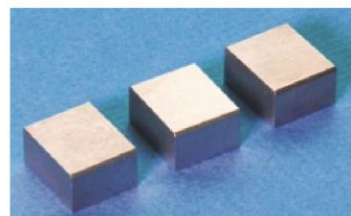
Производственные мощности

5 000 ШТ. в год

МАГНИТЫ НА ОСНОВЕ Pr–Dy–Fe–Co–В



ЛИТЫЕ МАГНИТЫ НА ОСНОВЕ Fe–Al–Ni–Co



ПРИМЕНЕНИЕ:

- датчики момента навигационных систем (гироскопы, акселерометры).

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- высокая стабильность магнитных свойств в широком температурном диапазоне (-60÷+80°C);
- изготовление цельных кольцевых магнитов с радиальной текстурой по чертежам заказчика.

Магнит	ТКИ, %/°C (-60÷120°C)	Остаточная индукция B_r , Тл	Коэрцитивная сила, кА/м	
			по намагниченности H_{cj}	по индукции H_{cb}
Цилиндрический с аксиальной или диаметральной текстурой (ТУ1-595-35-1582–2016)	0±0,005	0,95	950	600
Кольцевой с радиальной текстурой (ТУ1-595-35-1583–2016)	0±0,005	0,95	950	600

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- кольцевые магниты с радиальной текстурой из термостабильного магнитного материала;
- цилиндрические магниты с аксиальной или диаметральной текстурой из термостабильного магнитного материала;
- призматические магниты из термостабильного магнитного материала.

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
www.viam.ru



МОДЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ВОСКА ДЛЯ ЛИТЬЯ ДЕТАЛЕЙ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ОБЕСПЕЧИТ ИМПОРТОНЕЗАВИСИМОСТЬ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ
ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ.



Производственные мощности

до **60 000** кг модельных композиций
в год



Свойства	Значения свойств для композиции		
	ВИАМ МК-1	ВИАМ МК-2	ВИАМ МК-Л (для ЛПС)
Температура каплепадения, °С	80–90	85–95	50–70
Теплоустойчивость, °С	40	45	35
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	7,0	8,0	4,0
Массовая доля золы, % (не менее)	0,05	0,05	0,05

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
www.viam.ru



УЛЬЯНОВСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ОДНО ИЗ ВЕДУЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЛЬЯНОВСКОЙ
ОБЛАСТИ ПО РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ.

ПРОИЗВОДИТ ПОЛУФАБРИКАТЫ И ИЗДЕЛИЯ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ.



Производственные
мощности:

40 т	растворных связующих в год	25 т	расплавных связующих в год	100 м ²	формообразующих оснасток
50 000	пог.м	препрегов на основе растворных связующих	30 000	шт	листов стекло- и органопластиков
500 000	пог.м	клеевых препрегов марки КМКС	350 000	пог.м	препреги нового поколения
1 200	шт	заготовок панелей пола	20 т	заготовок изделий из ПКМ	

УНТЦ выпускает широкую номенклатуру материалов, полуфабрикатов и изделий из ПКМ на высоком научно-техническом уровне.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- клеевые препреги;
- препреги на основе расплавных связующих;
- клеевые пленки;
- заготовки панелей пола;
- заготовки обтекателей;
- заготовки гибких и жестких патрубков для СКВ ЛА;
- процессинг изготовления продукции на основе давальческих материалов;
- препреги на основе стеклотканей и полимерных связующих;
- препреги на основе углеродных тканей;
- полимерные связующие;
- листовой органопластик;
- формообразующие оснастки из ПКМ;
- листовой органопластик
- изделия из ПКМ по согласованию с заказчиком;
- дополнительное профессиональное образование «Технология ремонта изделий из ПКМ».

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
www.viam.ru; untc.viam.ru





ВОСКРЕСЕНСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

УНИКАЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ПО ОБРАБОТКЕ БЕРИЛЛИЯ И БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ, С ЗАМКНУТЫМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ ПРОИЗВОДСТВА.

НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЩАДЯХ ВЭТЦ ВИАМ ТАКЖЕ СОЗДАНЫ УЧАСТКИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.



Производственные мощности:

29 Т

бериллийсодержащие стали и сплавы в год

209

единиц технологического и исследовательского оборудования

10 Т

препрегов ПКМ в год

7700 м²

площадь производственных помещений

13

производственных участков



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- изготовление пластин и дисков бериллиевых герметичных, фольги бериллиевой вакуум-плотной радиационно-прозрачной повышенной чистоты толщиной от 10 мкм; паяных бериллиевых окон для рентгеновской техники; полуфабрикатов и изделий из бериллия по чертежам заказчика;
- нанесение гальванических и комплексных защитных покрытий на изделия из бериллия;
- выплавку сплавов ВНС-32 и 97НЛ-ВИ, алюминий-бериллиевой лигатуры АБ-1 и АБ-2, медно-бериллиевой лигатуры МБ-1 и МБ-2;
- изготовление прутков диаметром 12–60 мм из жаропрочной бериллийсодержащей коррозионностойкой стали марки ВНС-32-ВИ, ленты из бериллийсодержащего сплава 97НЛ-ВИ;
- изготовление клеев и клеевых связующих: ВСЭ-1212, ВСП-3М, ВСК-14-2МР, ВСК-14-2М, ВСВ-43, ВСЭ-34, ВСЭ-37, ВСЭ-33, ВПБ-45, ВСЭ-39, РСФ-250, ВСК-14-3, ВСК-14-4М;
- изготовление препрегов ПКМ шириной 300 и 1000 мм: ПУ-4э-2м, СТ-ВПС-33, ЭНФБ-2М, СТП-97с, СТ-69Н, СТ-69Н-14;
- изготовление углеродных тканых наполнителей полотняного и саржевого переплетения шириной 1000 мм для ПКМ: ВТкУ-2.200, ВТкУ-2.280, ВТкУ-3, ВТкУ-2.200Т;
- изготовление котонизированного льняного волокна, целлюлозного волокна, химическая модификация целлюлозы, формирование сверхлегких смесевых материалов на основе кварцевого и базальтового волокон с применением котонизированного льняного волокна, приготовление и иглопробивная обработка смеси высокотемпературных оксидных волокон и котонизированного льняного волокна, изготовление прекурсоров оксида циркония ОХЦ-В, оксида алюминия.

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
www.viam.ru; vetc.viam.ru





ГЕЛЕНДЖИКСКИЙ ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВИАМ ИМ. Г.В. АКИМОВА – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

ЕДИНСТВЕННЫЙ В РФ ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ
ИСПЫТАНИЙ, АККРЕДИТОВАННЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫМ
АГЕНТСТВОМ ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ), ВХОДЯЩИЙ
В МЕЖДУНАРОДНУЮ СЕТЬ СТАНЦИЙ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ATLAS MATERIAL TESTING TECHNOLOGY LLC.



Основные
показатели:

2118 м²

площадь лабораторно-
исследовательского
корпуса

>100

единиц испытательного
и исследовательского
оборудования

1100 м²

площадь атмосферного
испытательного полигона

200 м²

площадь
силового пола

Центр климатических испытаний расположен в приморской атмосфере умеренно теплого климата с мягкой зимой (ГОСТ 16350) с коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039 и C3-C5 по ISO 9223)

Атмосферный испытательный полигон:

Открытая площадка –
до **10000**
образцов одновременно



Площадка под навесом –
до **1000**
образцов одновременно



Силовой пол с нагрузкой
до **500 МПа**



Площадка для испытаний
узлов и конструкций –
288 м²



Испытания при совместном воздействии
климатических факторов,
статических и циклических нагрузок



Метеостанция,
работающая в непрерывном
автоматическом режиме



Лабораторные исследования:



Физико-механические
испытания



Исследования методами
неразрушающего контроля



Металлофизические
исследования



Химико-аналитические
исследования



Исследования теплофизических
свойств



Электрохимия
и исследования покрытий



Испытания при повышенной
температуре и влаге



Испытания при повышенных и пониженных
температурах, а также при их знако-
переменном воздействии



Испытания в коррозионно-
активных средах



Испытания и исследования
систем защиты

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- натурные испытания металлических и неметаллических материалов, систем защиты, конструкций, в том числе при совместном воздействии механических нагрузок и климатических факторов;
- полный комплекс лабораторных испытаний и исследований материалов, элементов конструкций, а также систем защиты;
- разработку, подбор, отработку методов и средств защиты от коррозии, старения и биоповреждений для металлических и неметаллических материалов, конструкций и изделий;
- установление сроков службы материалов в предполагаемых условиях эксплуатации.

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
www.viam.ru; gcki.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
www.ВИАМ.РФ; www.viam.ru