

№6
(112)
2022

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

№ 6 (112) июнь 2022

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

Каблов Е.Н. академик РАН, профессор

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

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

Члены совета:

Гейкин В.А.	докт. техн. наук, профессор (АО «ОДК»)
Демонис И.М.	канд. техн. наук
Кокорин В.Н.	докт. техн. наук, профессор (Ульяновский государственный технический университет)
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)
Петрова А.П.	докт. техн. наук, профессор (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Райтер Г.	докт. наук (ALD Vacuum Technologies GmbH, Германия)
Старцев В.О.	докт. техн. наук (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)
Стороженко П.А.	чл.-корр. 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, Ю.В. Коломиец;
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 г.

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).

Журнал входит в Международную ассоциацию издателей

(PILA – Publishers International Linking Association) и участвует в проекте CrossRef.

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

К 90-летию НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Жаропрочные сплавы и стали

Ломберг Б.С., Ахмедзянов М.В., Чабина Е.Б., Расторгуева О.И. **Высокожаропрочный деформируемый сплав для лопаток компрессора высокого давления перспективных газотурбинных двигателей**

Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М., Дорошенко А.В., Музафарова С.-В.Р., Самойлова И.И. **Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали**

Легкие сплавы

Арисланов А.А., Путырский С.В., Ширяев А.А., Володин А.В., Братухин А.В. **Исследование структуры и механических свойств крепежных изделий из высокопрочного псевдо-β-титанового сплава VT47**

Полимерные материалы

Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю., Смирнов О.И. **Влияние адгезионного грунта ЭП-0234 на свойства клеевых соединений, полученных с применением клея ВК-36**

Композиционные материалы

Гуляев И.Н., Сафронов А.М., Сатдинов Р.А. **Сравнение онлайн- и офлайн-технологий изготовления препрегов и свойств углепластиков**

CONTENTS

To the 90th anniversary of NRC “Kurchatov Institute” – VIAM

Heat-resistant alloys and steels

Lomberg B.S., Akhmedzyanov M.V., Chabina E.B., Rastorgueva O.I. **Heat-resistant wrought superalloy for high-pressure compressor blades of promising gas turbine engines**

Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. **Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel**

Light-metal alloys

Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Shiryayev A.A., Volodin A.V., Bratukhin A.V. **Study of the structure and mechanical properties of fasteners made of VT47 high-strength metastable β-titanium alloy**

Polymer materials

Petrova A.P., Lukina N.F., Isaev A.Yu., Smirnov O.I. **The effect of the adhesive primer EP-0234 on the properties of adhesive compounds obtained using adhesive VK-36**

Composite materials

Gulyaev I.N., Safronov A.M., Satdinov R.A. **Comparison online and offline of prepregs manufacturing technologies and properties of carbon fiber plastics**

Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1

58 Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1

Усачева М.Н., Хрульков А.В. Биodeградация армированных полимерных композиционных материалов (обзор)

68 Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Biodegradation of reinforced polymer composite materials (review)

Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Ахмадиева К.Р. Технологические особенности получения высокотемпературных полиимидных углепластиков. Зарубежный опыт (обзор)

80 Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Ahmadiyeva K.R. Technological features of obtaining high temperature polyimide carbons. Foreign experience (review)

Защитные и функциональные покрытия

Protective and functional coatings

Демин С.А., Заварзин С.В., Чередниченко И.В., Козлов И.А. Защитное противокоррозионное покрытие магнитов системы РЗМ–Fe–В

96 Demin S.A., Zavarzin S.V., Cherednichenko I.V., Kozlov I.A. Protective anticorrosive coating of magnets of the REM–Fe–B system

Антипов В.В., Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Фомина М.А., Французова Т.П., Козлов И.А. 90-летняя практика противокоррозионной защиты

108 Antipov V.V., Duyunova V.A., Oglochkov M.S., Fomina M.A., Frantsuzova T.P., Kozlov I.A. 90-year practice of anticorrosive protection

Испытания материалов

Material tests

Бутаков В.В., Шавнев А.А., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Подход к построению математической модели прохождения теплового фронта через образец теплозащитного материала в условиях нестационарного теплового потока

127 Butakov V.V., Shavnev A.A., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. An approach to the construction of a mathematical model of the passage of a heat front through a sample of a heat-shielding material under conditions of an unsteady heat flow

Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов

138 Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 3. Corrosion cracking of aluminum alloys

Конференции

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Conferences of

NRC «Kurchatov Institute» – VIAM

Решение VII Всероссийской научно-технической конференции «Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы», посвященной 125-летию со дня рождения авиаконструктора, ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини

150 The solution of the 7th All-Russian Scientific and Technical Conference «Climate-2022: modern approaches to assessment of influence of external factors on materials and complex technical systems», dedicated to the 125th anniversary of the birth of the aircraft designer, scientist-aerodynamicist Robert L. Bartini

Уважаемые коллеги!

В 2022 году Всероссийский (ранее – Всесоюзный) научно-исследовательский институт авиационных материалов (ныне – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) отмечает славный юбилей – 90 лет со дня основания. Страницы истории ВИАМ наполнены самоотверженной работой и свершениями на благо нашей страны, памятными датами, научными достижениями, определившими научно-технический прогресс. Ведь именно благодаря применению конструкторами материалов нового поколения и современных технологий удается реализовать уникальные конструкции и прорывные проекты в различных отраслях промышленности. Мы гордимся тем, что 95 % всех материалов, которые использовались при создании советской авиационной, ракетной, космической техники, – это материалы ВИАМ.

В создании нашего института принимали участие выдающиеся советские ученые, конструкторы, которые понимали, что именно материал определяет облик изделия, его массу, прочность и другие характеристики, позволяющие воплотить замысел разработчика. При этом существует основное требование: материал для авиационной техники должен быть легким, но в то же время очень прочным. Собственно над этими материаловедческими задачами коллектив успешно работает с первых дней основания – приказом наркома тяжелой промышленности СССР Г.К. Орджоникидзе ВИАМ создан 28 июня 1932 года в составе Главного управления авиационной промышленности.

С именем института связано зарождение и становление отечественного материаловедения – науки, представляющей собой фундаментальные и прикладные исследования для решения материаловедческих задач в авиа- и машиностроении, космической отрасли, энергетике, строительстве, медицине и других отраслях экономики. Разработки ученых ВИАМ стали весомым вкладом в Победу нашего народа в Великой Отечественной войне, в 1945 году институт был награжден орденом Ленина. ВИАМовцы принимали активное участие в создании технологической мощи Советского Союза – были разработаны материалы для космоса и реализации атомного проекта.

В стенах ВИАМ работали выдающиеся ученые – И.И. Сидорин, Г.В. Акимов, А.Т. Туманов, С.Т. Кишкин, Н.М. Скляр, Я.Д. Аврасин, И.Н. Фридляндер и многие другие. Специалистами института были созданы новые алюминиевые сплавы, высокопрочные сплавы и стали, разработаны первые методы неразрушающего контроля – все это имело определяющее значение для развития отечественного авиапрома.

Сегодня НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ является крупнейшим центром материаловедения в России и развивает фундаментальные и прикладные исследования в области металлургии и термической обработки конструкционных и функциональных материалов, аддитивных технологий, физической химии, химии полимеров, теплозащиты, коррозии, микологии, теории прочности и надежности, физических методов неразрушающего контроля. Проводятся комплексные исследования климатической стойкости конструкционных и функциональных материалов в условиях воздействия внешних факторов и в ожидаемых условиях эксплуатации.

Институту присвоен статус Государственного научного центра Российской Федерации, что свидетельствует о его особом, стратегически важном значении для государства. Безусловно, это заслуга всех сотрудников ВИАМ и его филиалов – Ульяновского научно-технологического центра, Воскресенского экспериментально-технологического центра по специальным материалам, Геленджикского центра климатических испытаний имени Г.В. Акимова. Ежедневно коллектив института решает задачи по разработке материалов нового поколения и технологических процессов их производства, отработывает способы и средства защиты материалов от коррозии, старения и износа. За большой вклад в разработку материалов нового поколения и технологий их переработки для авиационно-космического и оборонно-промышленного комплексов коллективу ВИАМ в 2002, 2007, 2012 и 2017 годах была объявлена благодарность Президента Российской Федерации.

На протяжении всей истории существования ВИАМ всегда отличал системный подход к решению самых сложных задач, которые ставило перед институтом руководство страны. Наша деятельность – это масштабная работа в целях развития отечественной промышленности и укрепления обороноспособности государства.

Действующие в ВИАМ 25 малотоннажных высокотехнологичных производств позволяют выпускать 253 наименования продукции и тем самым решать задачи как отечественного ОПК, так и других отраслей нашей промышленности. Кроме того, институт производит не только материалы, но и высокотехнологичное оборудование в кооперации с отечественными партнерами: специальные автоматизированные вакуумные плавильно-заливочные, вакуумно-дуговые установки и вакуумные установки для нанесения защитных жаропрочных покрытий по ионно-плазменной технологии.

В 2008 году В.В. Путин в ходе рабочего визита в ВИАМ поддержал инициативу разработки критических технологий в области авиационного двигателестроения. Важным шагом стало то, что одним из приоритетных направлений был определен проект по созданию двигателя ПД-14 для самолета МС-21. При разработке этого двигателя удалось получить качественное изменение основных параметров его рабочего режима, в том числе увеличение степени двухконтурности (в два раза), температуры газа перед турбиной (на 100 К), суммарной степени сжатия в компрессоре (на 20 %), благодаря чему удельный расход топлива снизился на 12 %, а экономичность работы двигателя и соответствие экологическим параметрам значительно повысились. Создание двигателя ПД-14 стало возможным благодаря применению 20 материалов нового поколения, разработанных в ВИАМ, и более 50 доработанных серийных марок материалов.

Впервые в отечественной инженерной и технологической практике сконструирована и изготовлена мотогондола ПД-14 из отечественных полимерных композиционных материалов, которые

обеспечили снижение массы конструкции не менее чем на 20 % при сохранении требуемых упруго-прочностных свойств, в том числе высоких ударной вязкости и стойкости к климатическим факторам.

Кроме того, методом аддитивных технологий из отечественной металлопорошковой композиции в ВИАМ была изготовлена первая «боевая» деталь двигателя ПД-14, полностью отвечающая требованиям конструкторской документации, – завихритель фронтального устройства камеры сгорания. Технологический цикл производства этих деталей составил всего шесть дней при стопроцентном выходе годного, тогда как традиционный технологический цикл – литье по выплавляемым моделям – составляет 60 дней при выходе годного 40 %. При этом производительность труда была увеличена в 10 раз.

В ВИАМ создан первый и единственный в нашей стране полный (замкнутый) цикл аддитивного производства. В настоящее время аддитивные технологии активно применяются на различных производствах и у нас в стране, и за рубежом. Относительно недавно в 3D-сфере началась новая эра – печать из металлических материалов. Именно эта технология аддитивного производства стала основой происходящей сейчас промышленной революции. Специалисты института стали первопроходцами в этой области: с 2014 года для аддитивных технологий разработан ряд уникальных сплавов, имеющих неоспоримые преимущества перед зарубежными материалами. Завершен вывод на рынок более 20 адаптированных сплавов, которые хорошо знакомы конструкторским бюро и серийным заводам.

Сегодня по аддитивным технологиям в институте организовано серийное производство деталей для двигателей ПД-14 и ТВ7-117СТ, также ведутся работы по разработке аддитивных технологий для двигателя большой тяги ПД-35 и вертолетных двигателей ВК-650В и ВК-1600В.

Кроме того, в беспрецедентно короткие сроки в ВИАМ разработали пять новых литейных жаропрочных сплавов для авиационного двигателя ПД-8. Это современный двухконтурный турбовентиляторный двигатель, головным разработчиком которого является ПАО «ОДК-Сатурн». Неоспоримым преимуществом нового двигателя перед предшественниками является улучшенный удельный расход топлива, пониженная стоимость жизненного цикла и соответствие всем экостандартам. Серийное производство новых сплавов организовано на мощностях высокотехнологичного научно-производственного комплекса НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Разработанные материалы превосходят по уровню механических и эксплуатационных свойств зарубежные сплавы-аналоги.

Ведется также работа по импортозамещению металлопорошковых композиций для нанесения высокотемпературных защитных покрытий на ответственные детали газотурбинных установок и двигателей. Всего освоено более 60 марок материалов, в том числе критически необходимых для локализации производства ГТУ.

По инициативе ВИАМ в 2011 году с учетом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, тенденций развития материалов в мире, стратегий инновационного развития интегрированных структур были разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». Этот документ, актуализированный в 2017 году, одобрен на межотраслевых совещаниях с участием представителей федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, Российской академии наук, интегрированных структур, государственных научных центров, ведущих конструкторских бюро, национальных исследовательских университетов, предприятий металлургической и химической промышленности. Стратегические направления согласованы 13 генеральными конструкторами, пятью руководителями приоритетных технологических направлений, одобрены научно-техническим советом Военно-промышленной комиссии Российской Федерации. В 2019 году Стратегические направления одобрены на Коллегии ВПК и утверждены НТС ВПК.

В «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» заложены базовые принципы создания материалов нового поколения и сложных технических систем. В настоящее время этот документ играет определяющую роль в проведении прорывных исследований в авиационно-космической отрасли, является базисом, на основе которого выполняется разработка инновационных материалов и технологий нового поколения, создается высокотехнологичная продукция. При этом важно подчеркнуть, что успешная работа ВИАМ основывается на тесном сотрудничестве с институтами Российской академии наук, отраслевыми институтами, государственными научными центрами, государственными корпорациями и интегрированными компаниями.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина 2022–2031 годы в России объявлены десятилетием науки и технологий. И мы понимаем, насколько важна роль отечественного материаловедения в эпоху глобальных геополитических перемен, ведь материалы всегда играли системообразующую роль в создании конкурентоспособной продукции. Сегодня перед нами стоит цель – обеспечить разработку и серийное производство сложных технических систем полностью на основе отечественных материалов.

Следует отметить, что у ВИАМ действительно мощные традиции, и именно это во многом определяет успех нашей работы на протяжении десятилетий. Мы отдаем дань глубокого уважения ученым и специалистам института за вклад, который они внесли в решение важнейших вопросов в сфере материаловедения.

В завершение хочется поздравить всех коллег с юбилеем ВИАМ и еще раз подчеркнуть, что наша работа имеет стратегическое значение для укрепления обороноспособности государства и достойного ответа всем глобальным вызовам извне. Желаю вам новых успехов на благо российской науки!

В.В. Антипов,
и.о. генерального директора
НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, д.т.н.

Научная статья

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14

**ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫЙ ДЕФОРМИРУЕМЫЙ СПЛАВ
ДЛЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**Б.С. Ломберг¹, М.В. Ахмедзянов¹, Е.Б. Чабина¹, О.И. Расторгуева¹

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

Аннотация. Разработан деформируемый высокожаропрочный сплав ВЖ179-ИД для лопаток последних ступеней компрессора высокого давления с рабочей температурой до 800 °С газотурбинных двигателей большой тяги. Для достижения требуемых показателей по механическим свойствам проведены структурные исследования, результаты которых использованы при определении режимов термической обработки сплава. По комплексу механических свойств разработанный сплав обладает значительными квотами превосходства как по сравнению с аналогом по применению сплавом ЭП718-ИД, так и с наиболее жаропрочным деформируемым сплавом для лопаток ЭП220.

Ключевые слова: высокожаропрочный деформируемый сплав, технология, пруток, структура, термическая обработка, компрессор высокого давления

Для цитирования: Ломберг Б.С., Ахмедзянов М.В., Чабина Е.Б., Расторгуева О.И. Высокожаропрочный деформируемый сплав для лопаток компрессора высокого давления перспективных газотурбинных двигателей // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14.

Scientific article

**HEAT-RESISTANT WROUGHT SUPERALLOY FOR HIGH-PRESSURE
COMPRESSOR BLADES OF PROMISING GAS TURBINE ENGINES**B.S. Lomberg¹, M.V. Akhmedzyanov¹, E.B. Chabina¹, O.I. Rastorgueva¹

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

Abstract. A wrought heat-resistant superalloy VZh179-ID has been developed for blades of the last stages of a high-pressure compressor with an operating temperature up to 800 °C of high-thrust gas turbine engines. To achieve the required indicators for mechanical properties structural studies have been carried out, the results of which are used in determining the models of alloy's heat treatment. According to the complex of mechanical properties the developed alloy has significant quotes of superiority both in comparison with EP718-ID alloy and the most heat-resistant wrought alloy for blades EP220.

Keywords: heat-resistant wrought superalloy, technology, bar, structure, thermal treatment, high-pressure compressor

For citation: Lomberg B.S., Akhmedzyanov M.V., Chabina E.B., Rastorgueva O.I. Heat-resistant wrought superalloy for high-pressure compressor blades of promising gas turbine engines. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-5-14.

Введение

Для соответствия перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) мировым стандартам требуется применение новых материалов и технологий [1–4]. В связи с этим с учетом требований к работе компрессора высокого давления (КВД) перспективных ГТД большой тяги (35–50 тс) при повышенных температурах воздуха, частотах и амплитудах аэромеханического возбуждения, для лопаток КВД последних ступеней требуется сплав, существенно превосходящий по эксплуатационным характеристикам применяемые в серийных ГТД сплавы.

Новый материал должен обладать высокой кратковременной и длительной прочностью при повышенных рабочих температурах (до 800 °С), а также высоким сопротивлением усталости, в том числе при возникновении дефектов. В основном в серийных ГТД применяют сплавы ЭИ787 и ЭП718, не отвечающие повышенным требованиям к механическим свойствам перспективных ГТД.

Для перспективных ГТД требуется материал с более высокими характеристиками кратковременной и длительной прочности ($\sigma_{\text{в}}^{20^\circ} \geq 1280$ МПа, $\sigma_{100}^{650^\circ} \geq 880$ МПа и $\sigma_{100}^{800^\circ} \geq 490$ МПа). При этом свойства при циклических нагрузках должны превосходить свойства для серийных материалов.

В качестве аналогов рассмотрены отечественные сплав ЭП718-ИД (по применению) и самый жаропрочный деформируемый сплав ЭП220, применявшийся для лопаток турбин в серийных двигателях третьего поколения.

При разработке нового материала учтено, что уровень служебных характеристик жаропрочных сплавов определяется степенью упрочнения твердого раствора (γ); количеством, дисперсностью и стабильностью упрочняемой γ' -фазы; состоянием поверхностей раздела, в первую очередь – границ зерен [5].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6–8].

Материалы и методы

При проведении исследования использована система на основе Ni, при легировании которой реализованы все современные принципы, применяемые при разработке современных деформируемых жаропрочных сплавов:

- твердорастворное упрочнение γ -матрицы (Cr, Co, W, Mo);
- дисперсионное упрочнение γ' -фазой (Al, Ti, Ta);
- упрочняющее влияние карбидов типа MeC;
- микролегирование поверхностей раздела (границы зерен и фаз) – В, Mg и редкоземельными металлами.

Новому материалу присвоена марка ВЖ179-ИД* (ХН57КВМЮТ-ИД, ЭК197-ИД). Получен патент № 2737835 «Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него» [9].

В условиях промышленного производства на предприятии АО «Металлургический завод «Электросталь» отработаны технологические режимы выплавки слитков в вакуумных индукционных и вакуумнодуговых печах, а также технология изготовления прутков.

* Правообладатель АО «ОДК».

Выплавку электродов из сплава ВЖ179-ИД проводили в 1,5 т вакуумно-индукционной печи Consarc; вакуумно-дуговой переплав слитков проводили с использованием кристаллизатора диаметром 290 мм. Далее на горизонтальном прессе с усилием 6300 тс по схеме двойного прессования в режиме сверхпластичности получали прутки диаметром 50 и 70 мм.

Опробована также прокатка на стане 350/250 прутков на диаметр 50 мм. При деформации слитков достигнут хороший уровень технологической пластичности, обеспечивший получение прутков диаметром 70 и 50 мм.

Проведена общая квалификация (паспортизация) прутков из сплава ВЖ179-ИД и выпущены технические условия на поставку прутков ТУ 14-131-1296–2020. Исследование полуфабрикатов проводили в Испытательном центре НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Для исследования микроструктуры применяли оптическую и электронную растровую микроскопию, а также микрорентгеноспектральный анализ для определения локального химического состава. Размер микрозерна определяли по ГОСТ 5639–82.

Определение температур фазовых превращений методом дифференциального термического анализа проводили в диапазоне температур от 20 до 1400 °С при нагреве со скоростью 20 К/мин в среде гелия.

Для определения видов, режимов и объемов испытаний в соответствии со стандартом НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ СТО 1-595-407–2012 «Паспортизация материалов для изделий авиационной и специальной техники» и ТЗ-0072–2017 (I этап, средние значения) разработана Программа паспортизации жаропрочного никелевого сплава марки ВЖ179-ИД.

В связи с тем, что предыдущие сплавы такого класса разрабатывали более 50 лет назад, многие характеристики свойств определены впервые.

Испытания образцов для определения кратковременных свойств проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 (при температуре 20 °С) и ГОСТ 9651–84 (при температурах 650–850 °С); пределов длительной прочности – по ГОСТ 10145–81 (при температурах 650–850 °С) на базах 10, 100 и 500 ч; ударной вязкости – по ГОСТ 9454–78 (при температурах 20–800 °С). Все испытания проводили на современных испытательных машинах [10].

Циклические испытания (многоцикловая (МнЦУ) и малоцикловая (МЦУ) усталость) проводили в соответствии с ГОСТ 25.502–79, испытания на определение скорости роста трещины усталости (СРТУ) при температурах 20, 750 и 800 °С – в соответствии с ASTM E 647 [11]. Все циклические испытания проводили на сервогидравлических испытательных машинах. Полученные экспериментальные данные обработаны при помощи линейного регрессионного анализа методом наименьших квадратов, где кривая аппроксимируется прямой линией в двойных логарифмических координатах $\log(dI/dN) - \log(\Delta K)$.

По результатам проведенных исследований выпущен паспорт на сплав ВЖ179-ИД.

Результаты и обсуждение

С учетом сложного легирования нового материала необходимо использовать технологию деформации, которая бы обеспечила получение прутков диаметром 50 мм с бездефектной поверхностью.

С этой целью разработаны режимы термомеханической обработки слитков и промежуточных заготовок с микродуплексной структурой, позволившей получить при температурах деформации материал в состоянии сверхпластичности.

Относительное удлинение образцов, испытанных при температурах деформации, составило 380–420 %.

Кроме того, помимо схемы двойного прессования, опробована также схема, по которой промежуточную заготовку получали прессованием с последующей прокаткой на круг диаметром 50 мм.

Для получения оптимального комплекса механических свойств сплава ВЖ179-ИД разработан специальный режим термической обработки.

В связи с тем, что сплав ВЖ179-ИД относится к сплавам с большим количеством упрочняющей γ' -фазы (≥ 50 %), при определении режимов закалки и старения руководствовались разработанными ранее положениями, которые использованы для сложнолегированных высокожаропрочных дисковых сплавов и обеспечивали получение однородной стабильной микроструктуры [5].

На рис. 1 представлена кривая дифференциальной сканирующей калориметрии сплава ВЖ179-ИД, свидетельствующая об отсутствии в структуре материала избыточных и топологически плотноупакованных фаз. Эти данные были взяты за основу при разработке термической обработки сплава.

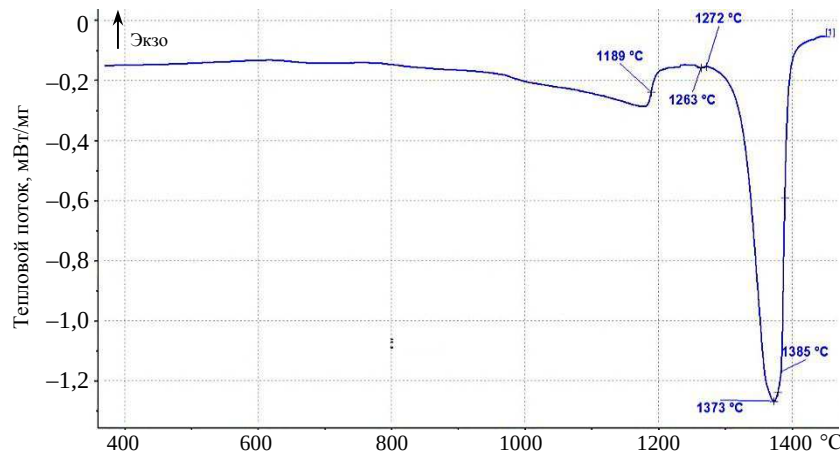


Рис. 1. Кривая дифференциальной сканирующей калориметрии сплава ВЖ179-ИД

Термическая обработка полученных прутков состояла из следующих операций:

- гомогенизирующий отжиг при температурах на 100–150 °C ниже температуры полного растворения γ' -фазы ($T_{п.р.\gamma'}$), обеспечивающий (благодаря релаксации напряжений в структуре, а также за счет частичного растворения мелких частиц γ' -фазы (0,1 мкм) и дальнейшего укрупнения частиц размером 5–10 мкм) повышение однородности твердого раствора, более равномерные и благоприятные условия для собирательной рекристаллизации в процессе закалки и получение однородного микроструктура (2–3 балла по ГОСТ 5639–82) [5, 12];

- закалка при температуре $T_{п.р.\gamma'}$, обеспечивающая однородную микроструктуру и наилучший комплекс механических свойств;

- двухступенчатое старение для создания условий максимального выделения γ' -фазы разной дисперсности; для получения стабильной структуры температура первой ступени старения выбрана в области начала растворения γ' -фазы, а второй ступени – в области, близкой к максимальной рабочей температуре лопатки.

Дополнительным критерием при выборе температуры закалки послужил размер рекристаллизованного микроструктура (рис. 2). В табл. 1 показано влияние размера зерна после закалки на время до разрушения при испытании на длительную прочность.

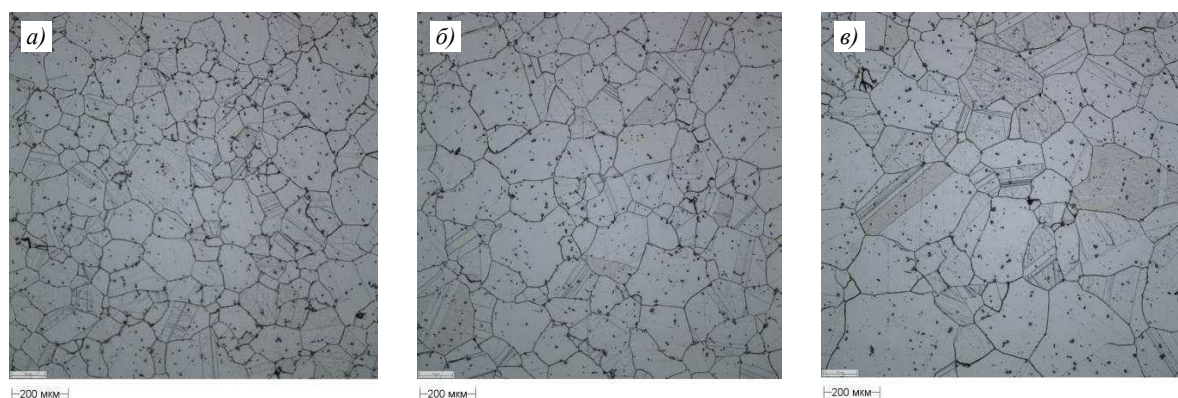


Рис. 2. Микроструктура ($\times 50$) прутка из сплава ВЖ179 с размером зерна 105 (а), 107 (б) и 135 мкм (в)

Таблица 1

Размер зерен прутка из сплава ВЖ179-ИД

Средний размер зерна, мкм	Время до разрушения, ч	Балл зерна
105	87	2–4
107	99	2–4
127	112	2–3
123	190	2–3
135	121	2
204	90	1–2

Установлено, что размер зерна влияет на время до разрушения при температуре 800 °С. Оптимальной температурой закалки будет та температура, которая обеспечивает средний размер зерна 120–135 мкм по ГОСТ 5639–82.

Типичная микроструктура прутков из сплава ВЖ179-ИД после термической обработки и дополнительной выдержки в течение 1000 ч приведена на рис. 3.

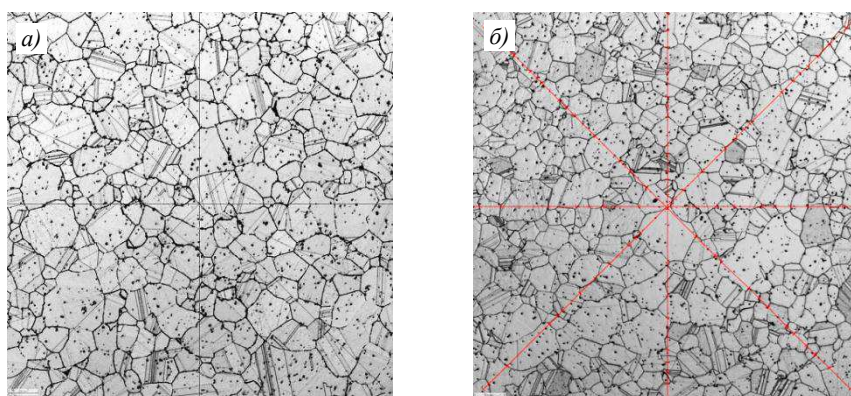


Рис. 3. Микроструктура ($\times 50$) прутка из сплава ВЖ179-ИД после полной термической обработки (а) и после полной термической обработки и дополнительной выдержки в течение 1000 ч (б)

Видно (рис. 3, а), что после полной термической обработки микроструктура прутков сплава ВЖ179-ИД однородная с размером зерна 2–3 балла по ГОСТ 5639–82. Структура сплава стабильная. После выдержки при максимальной рабочей температуре 800 °С в течение 1000 ч (рис. 3, б) изменений размера зерна не обнаружено, дополнительные выделения или топологически плотноупакованные фазы отсутствуют.

Средняя долговечность образцов, испытанных после выдержки на длительную прочность при температуре 800 °С и нагрузке 490 МПа, составила 179 ч.

Механические свойства, включая циклические характеристики прутков из сплава ВЖ179-ИД, приведены в табл. 2 и на рис. 4–6.

Таблица 2

Механические свойства сплавов для лопаток компрессора высокого давления

Температура испытания, °С	Свойства	Средние значения свойств для сплавов				Квоты превосходства сплава ВЖ179, %		
		ВЖ179- ИД	ЭП718- ИД*	ЭП220**	Inconel 718***	ЭП718-ИД	ЭП220	Inconel 718
Максимальная рабочая температура, °С		800	700	950	650	14	–	23
20	Плотность, г/см ³	8,36	8,29	8,40	8,19	–	–	–
20–800	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	14,9	15,7	14,9	16,5	5	–	10
650	$\sigma_{100}, \text{МПа}$	1040	570	–	710	В 1,8 раза	–	В 1,5 раза
800		510	245	470	–	В 2,1 раза	9	–
20	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	1400	1230	1040	1320	14	35	6
	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	960	830	750	1060	16	28	–
	$\delta, \%$	20	27	12	12	–	В 1,4 раза	В 1,4 раза
800	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	1000	670	930	–	В 1,5 раза	8	–
	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	860	600	–	–	В 1,4 раза	–	–
	$\delta, \%$	17	19	9	–	–	В 1,8 раза	–
20	KCU, Дж/см ²	37,5	91,0	27,0	–	–	В 1,4 раза	–

* Свойства для прутка диаметром 90 мм после термической обработки [13].

** Свойства катаного прутка диаметром 45 мм после термической обработки [13].

*** INCONEL® alloy 718 (AMS 5662, 5663, 5664) – свойства для прутка диаметром от 16 до 64 мм после термической обработки [14].

* Свойства для прутка диаметром 90 мм после термической обработки [13].
 ** Свойства катаного прутка диаметром 45 мм после термической обработки [13].
 *** INCONEL® alloy 718 (AMS 5662, 5663, 5664) – свойства для прутка диаметром от 16 до 64 мм после термической обработки [14].

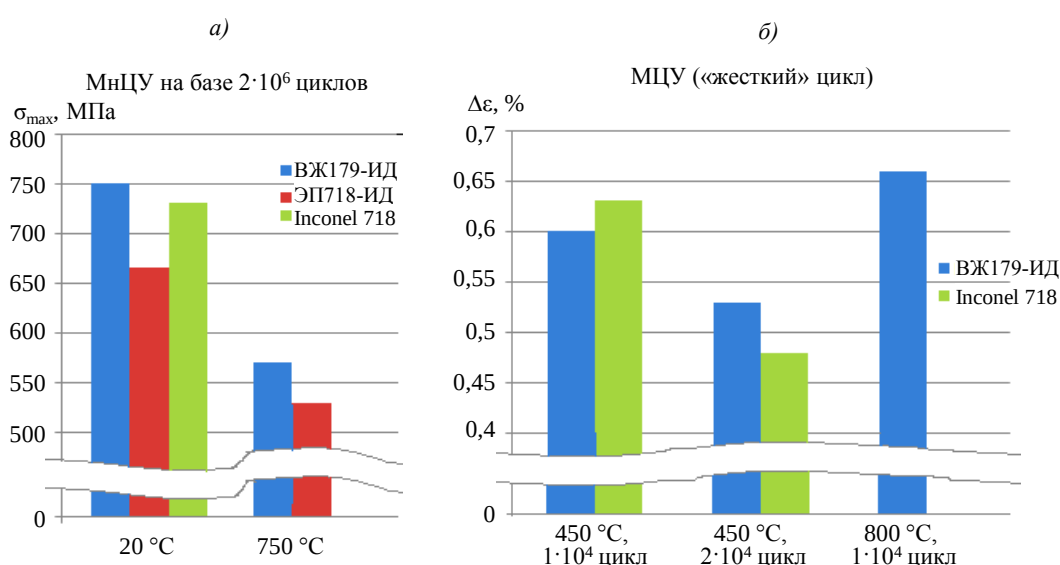


Рис. 4. Сравнение пределов ограниченной выносливости (средние значения) на гладких образцах из сплавов ВЖ179-ИД, ЭП718-ИД и Inconel 718: а – при контролируемой осевой нагрузке ($R_\sigma = 0$); б – при контролируемой деформации ($R_\epsilon = 0$)

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что кратковременные свойства сплава ВЖ179-ИД превосходят свойства сплава-аналога по применению (лопатки КВД) ЭП718-ИД на 14–16 % (при температуре 20 °С) и в 1,4–1,5 раза (при температуре 800 °С); по длительной прочности при температурах 650 и 800 °С – в 1,8 и 2,1 раза соответственно.

Превосходство над наиболее жаропрочным деформируемым сплавом ЭП220 для лопаток составляет по кратковременной прочности при 20 °С: 28–35 %, при 800 °С: 8 %, по длительной прочности при 800 °С: 9 %. Относительное удлинение сплава ВЖ179-ИД при этих температурах также больше в 1,4 и 1,8 раза соответственно.

При этом следует отметить, что такие важные для лопаток КВД свойства, как МнЦУ и МЦУ (рис. 4), у сплава ВЖ179-ИД больше, чем у применяемых в настоящее время сплавов ЭП718-ИД и Inconel 718 [14].

Сплав ВЖ179-ИД при испытании на длительную прочность не чувствителен к надрезу в диапазоне температур 650–850 °С ($\sigma_{\tau}^H / \sigma_{\tau}^{гн} > 1,15\text{--}1,2$).

Впервые для высокожаропрочных деформируемых сплавов для лопаток построены кривые скорости роста трещины усталости (СРТУ) при температурах 20, 750 и 800 °С**, графики которых представлены на рис. 5 и 6.

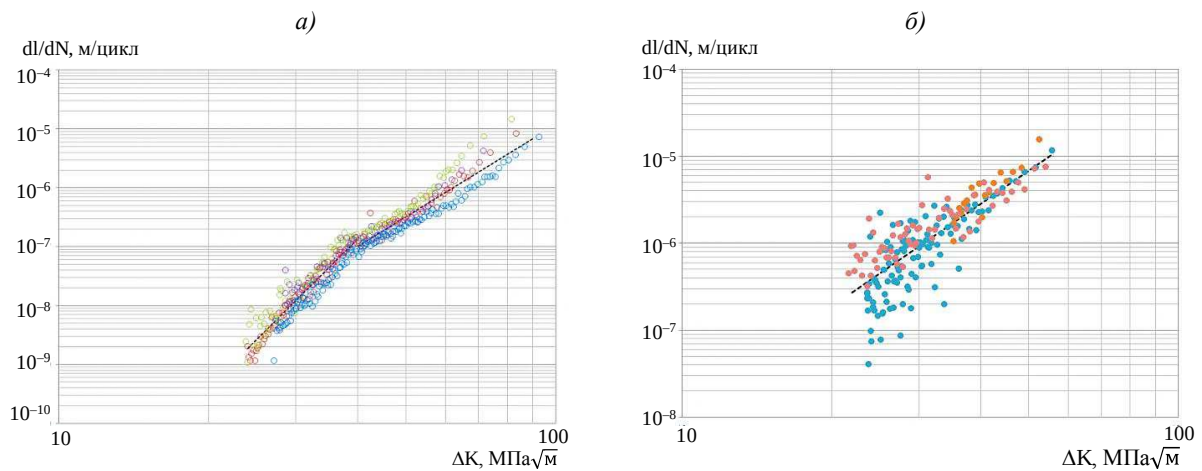


Рис. 5. Кривые скорости роста трещины усталости (СРТУ) для сплава ВЖ179-ИД при температурах 20 (а) и 800 °С (б)

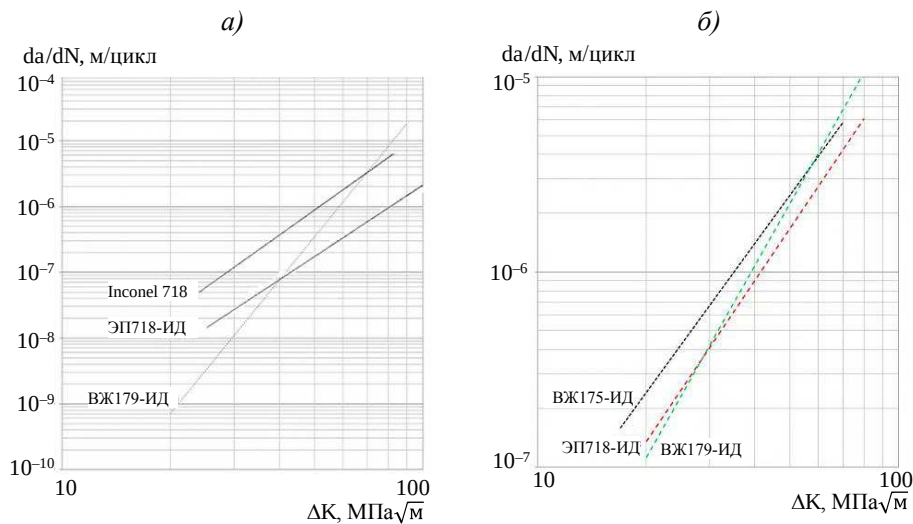


Рис. 6. Сравнение значений скорости роста трещины усталости (СРТУ) сплавов ВЖ179-ИД, ВЖ175-ИД, ЭП718-ИД и Inconel 718 при температурах 20 (а) и 750 °С (б) [14, 15]

** Работа выполнена в ИЦ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ под руководством к.т.н. М.А. Горбовца и И.А. Ходинаева.

Приведенные данные показывают, что сплав ВЖ179-ИД, существенно превосходящий сплавы-аналоги по прочностным и жаропрочным свойствам, по циклическим характеристикам полностью соответствует уровню серийных материалов или превосходит их.

С целью определения качества полученных по различным схемам деформации полуфабрикатов изготовлены образцы из прессованных и катаных прутков диаметром 50 мм производства АО «Металлургический завод «Электросталь» и проведены механические испытания. Результаты приведены в табл. 3 и 4 (все образцы доведены до разрушения).

Таблица 3

Результаты испытаний механических свойств (средние значения) при комнатной температуре прессованного и катаного прутков диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД

Схема деформации	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²
	МПа		%		
Двойное прессование	1400	960	20,0	21,0	37,5
Прессование + прокатка	1420	1010	18,5	18,0	38,0

Таблица 4

Результаты испытаний (средние значения) механических свойств и длительной прочности при температуре 800 °С прессованного и катаного прутков диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД

Схема деформации	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Время до разрушения, ч, при 800 °С и $\sigma = 490$ МПа
	МПа		%		
Двойное прессование	1000	860	16,5	19,5	204
Прессование + прокатка	1020	920	16,0	16,5	146

Анализ результатов основных механических свойств и длительной прочности показал, что прутки диаметром 50 мм, полученные по разным схемам деформации, из сплава ВЖ179-ИД имеют практически одинаковый уровень значений. Поэтому для изготовления полуфабрикатов из сплава применима как технология двойного прессования, так и прессования промежуточной заготовки с последующей прокаткой.

Заключения

Для лопаток КВД перспективных ГТД разработан и паспортизован высокожаропрочный деформируемый сплав ВЖ179-ИД, превосходящий по комплексу свойств применяемые в серийных двигателях зарубежные и отечественные сплавы.

В условиях промышленного производства предприятия АО «Металлургический завод «Электросталь» разработана технология получения прутков диаметром 50–70 мм и выпущены технические условия на поставку прутков ТУ 14-131-1296–2020.

Для достижения требуемых показателей по механическим свойствам проведены структурные исследования, результаты которых использованы при определении режимов термической обработки сплава.

Анализ результатов основных механических свойств и длительной прочности показал, что прутки диаметром 50 мм из сплава ВЖ179-ИД, полученные по разным схемам деформации (двойное прессование и прессование промежуточной заготовки с последующей прокаткой), имеют практически одинаковый уровень значений. Поэтому для изготовления полуфабрикатов из сплава применимы обе технологии.

Сплав ВЖ179-ИД рекомендован для опробования в производственно-эксплуатационных условиях для изготовления лопаток КВД, работающих при температуре до 800 °С.

Список источников

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Иноземцев А.А. Материалы и технологии для двигателя ПД-14 // Тез. Междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России»: науч. электрон. изд. М.: ВИАМ, 2012. Ст. 16. 1 электрон. опт. диск.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
4. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
5. Ломберг Б.С., Чударева Л.Т., Серёгина Н.И. Влияние структуры сплава ЭП975-ИД на свойства крупногабаритных штамповок // Авиационные материалы. 1984. № 3. С. 9–17.
6. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
7. 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.
8. 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.
9. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2737835 Рос. Федерация. № 2020118382; заявл. 03.06.20; опубл. 03.12.20.
10. Горбовец М.А., Славин А.В. Доказательство соответствия материала требованиям Части 33 Авиационных правил // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
11. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
12. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1978. 568 с.
13. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2018. Т. 2: Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. 248 с.
14. INCONEL® alloy 718. URL: <http://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel> (дата обращения: 24.01.2022).
15. Ходинев И.А., Монин С.А., Рыжков П.В. Исследование скорости роста трещины усталости в жаропрочных никелевых сплавах // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 48–63. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-48-63.

References

1. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. Krylya Rodiny, 2019, no. 7–8. pp. 54–58.
2. Inozemtsev A.A. Materials and technologies for the PD-14 engine. Proceedings of International Scientific and Technical Conference "New materials and technologies for deep processing of raw materials – the basis for the innovative development of the Russian economy". Moscow: VIAM, 2012, art. 16, 1 CD-ROM.
3. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Letnikov M.N., Mazalov I.S. The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2017, no. S, pp. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.

4. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-2-3-11.
5. Lomberg B.S., Chudareva L.T., Seryogina N.I. Influence of the structure of the EP975-ID alloy on the properties of large-sized forgings. *Aviatsionnye materialy*, 1984, no. 3, pp. 9–17.
6. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
7. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
8. 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.
9. Heat-resistant wrought nickel-based alloy and product made from it: pat. 2737835 Rus. Federation, no. 2020118382; filed. 03.06.20; publ. 03.12.20.
10. Gorbovets M.A., Slavin A.V. Proof of material compliance with the requirements to part No. 33 of JARs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-89-94.
11. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
12. Gorelik S.S. Recrystallization of metals and alloys. Moscow: Metallurgiya, 1978, 568 p.
13. Aviation materials: reference book in 13 vols. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2018. Vol. 2: Deformable heat-resistant steels and alloys. Alloys based on refractory metals, 248 p.
14. *INCONEL® alloy 718*. Available at: <http://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel> (accessed at: January 24, 2022).
15. Khodinev I.A., Monin S.A., Ryzhkov P.V. Investigation of the growth rate of a fatigue crack in heat-resistant nickel alloys. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 4 (104), pp. 48–63. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-104-4-48-63.

Информация об авторах

Ломберг Борис Самуилович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ахмедзянов Максим Вадимович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чабина Елена Борисовна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Расторгуева Ольга Игоревна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Boris S. Lomberg, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Elena B. Chabina, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.03.2022.
The article was submitted 21.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 09.03.2022.

Научная статья

УДК 669.14+669.15-194.55

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРСНОСТИ СТРУКТУРЫ МАРТЕНСИТА И РАЗМЕРА КАРБИДНОЙ ФАЗЫ НА ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Г.С. Севальнев¹, Е.Н. Коробова¹, Р.М. Дворецков¹, А.В. Дорошенко¹,
С.-В. Р. Музафарова², И.И. Самойлова³

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

²Акционерное общество «ОДК-Климов», Москва, Россия; klimov@klimov.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Рассмотрено влияние степени дисперсности мартенситной структуры на триботехнические характеристики высокоуглеродистой комплексно-легированной стали. После упрочняющей термической обработки образцов с различными степенями деформации получены образцы со структурой от мелко- до крупноигльчатого мартенсита. По результатам испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения установлено, что скорость изнашивания образцов с мелкоигльчатой мартенситной структурой по сравнению со скоростью образцов со средне- и крупноигльчатой мартенситной структурой меньше на 50 и 70 % соответственно.

Ключевые слова: подшипник, износостойкость, трение, дисперсность мартенсита, микроструктура, твердость

Для цитирования: Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М., Дорошенко А.В., Музафарова С.-В.Р., Самойлова И.И. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.

Scientific article

INFLUENCE OF THE DEGREE OF MARTENSITIC STRUCTURE DISPERSION AND SIZE OF CARBIDE PHASE ON THE FRICTIONAL INTERACTION UNDER CONDITIONS OF DRY SLIDING FRICTION OF HIGH-CARBON COMPLEX ALLOY STEEL

G.S. Sevalnev¹, E.N. Korobova¹, R.M. Dvoreckov¹, A.V. Doroshenko¹,
S.-V.R. Muzafarova², I.I. Samoilova³

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

²Joint Stock Company «UEC-Klimov», Moscow, Russia; klimov@klimov.ru

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. The article considers the effect of the martensitic structure dispersion degree on the tribotechnical characteristic of high carbon complex-alloyed steel. After hardening heat treatment of samples with a various degree of deformation there have been obtained samples with a structure from fine- to large-needle martensite. According to the results of the wear test under conditions of dry sliding friction it has been found that samples with a structure of fine-needle martensite have a wear rate lower by 50 and 70 % compared to medium- and large-needle martensitic structures.

Keywords: bearing, wear resistance, friction, dispersion of martensite, microstructure, hardness

For citation: Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.

Введение

Подшипники качения являются одним из наиболее ответственных элементов большинства машин и механизмов в машиностроительной отрасли. Требования, предъявляемые к качеству подшипников в авиационной промышленности, намного превосходят требования к подшипникам в других областях машиностроения. Совершенствование авиационной техники требует постоянного улучшения конструкций подшипников, повышения их грузоподъемности, точности и скорости вращения, долговечности и надежности в условиях сложного напряженного состояния при циклических нагрузках. В связи с этим материалы, из которых изготавливают тела качения и кольца, должны обладать достаточными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими высокую работоспособность изделий [1–4].

Основной характеристикой, определяющей долговечность работы подшипников качения, является контактная выносливость материала. Известно, что при качественном монтаже и оптимальных условиях работы подшипников качения их повреждаемость и выход из строя происходят в результате разрушений усталостного характера [5–8]. Однако существует ряд факторов, значительно влияющих на их работоспособность. Одним из таких факторов является износ поверхностей качения, который может возникать по следующим причинам: значительное проскальзывание тела относительно опоры качения, попадание в зону трибоконтакта абразивных частиц, работа в условиях «смазочного голодания», возникновение и повышение уровня вибраций [5]. Относительное проскальзывание поверхностей качения чаще всего свойственно подшипникам с увеличенным радиальным зазором при действии легких нагрузок и вращении с повышенной частотой. Изнашивание подвижных опор машин вызывает потерю точности взаимного расположения деталей и перемещений, что приводит к возникновению чрезмерных вибраций и разрушению [9].

Помимо этого, большое влияние на трибосопряжение деталей подшипников оказывает смазка трущихся поверхностей. В том случае, если при работе в высокоскоростной тяжелонагруженный подшипник подается смазочный материал в недостаточном количестве, наступает режим «смазочного голодания». Снижение количества смазочного материала в зоне контакта вызывает увеличение коэффициента трения, значительно повышающего температуру подшипников, и движение качения переходит в скольжение, сопровождаемое значительным изнашиванием поверхностей качения [9, 10].

Величина износа деталей подшипников, помимо конструктивных особенностей, точности изготовления, монтажа и режимов работы подшипниковых узлов, зависит от химического состава используемого материала. Для обеспечения требуемой работоспособности

и надежности этих изделий применяют высокоуглеродистые комплексно-легированные стали мартенситного класса, способные работать в условиях интенсивного изнашивания, экстремальных температур (в диапазоне 350–500 °С) без значительного разупрочнения и выдерживать высокие циклические нагрузки различного характера [11–16]. Формирование высокоуглеродистого мартенсита в совокупности с твердыми избыточными фазами после упрочняющей термической обработки позволяет таким сталям работать в условиях интенсивного изнашивания и контактной усталости.

Износостойкость является структурно-чувствительной характеристикой, и формирование высокой твердости не всегда приводит к получению максимальной износостойкости. Параметры структурных составляющих (дисперсность мартенсита, количество и морфология карбидов) и их распределение по объему детали также имеют большое значение при формировании триботехнических характеристик [17].

Цель данной работы – исследование структуры и оценка влияния степени дисперсности мартенсита на триботехнические характеристики высокоуглеродистой комплексно-легированной стали для авиационных подшипников.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали образцы из высокоуглеродистой комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали системы легирования С–Cr–Mo–V, содержащей в химическом составе тугоплавкие карбидообразующие элементы W и Ta.

Металлографические исследования структуры проводили, в соответствии с ГОСТ 8233–56 и ГОСТ 5639–82, на оптическом микроскопе Olympus GX-51, оснащенном фотокамерой и программой анализа изображений Analysis, на металлографических шлифах, вырезанных в поперечном направлении после травления в 4 %-ном спиртовом растворе HNO_3 .

Исследование структурных составляющих и расчет стехиометрии избыточных фаз после термической обработки осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi SU8010 в режиме вторичных и обратноотраженных электронов при рабочих увеличениях $\times 2500$ и ускоряющем напряжении 15 кВ с приставкой для проведения микрорентгеноспектрального анализа с применением программного обеспечения Aztec. Для анализа распределения легирующих элементов в структуре матрицы выполняли поэлементное картирование с помощью энергодисперсионных спектров.

ДюрOMETрические исследования проводили по методу Виккерса на твердомере Durascan 20 по ГОСТ 2999–75.

Измерение твердости осуществляли по методу Роквелла на твердомере DuraVision 300 по ГОСТ 9013–59.

Исследование триботехнических характеристик образцов из теплостойкой подшипниковой стали проводили путем испытания образцов на изнашивание в условиях сухого трения скольжения с использованием трибометра Nanovea T-50. Испытания осуществляли по схеме «стержень–диск» (pin-on-disk) при линейной скорости скольжения образца относительно контртела $\sim 0,1$ м/с и с нагрузкой на стержень 10 Н (1 кг). Контртелом при испытаниях являлся шарик диаметром 6 мм из хромистой стали мартенситного класса ШХ15-ШД (зарубежный аналог – сталь AISI 52100) с твердостью 64 HRC (940 HV). Во время испытаний с помощью датчика сопротивления измеряли коэффициент трения, а с помощью датчика линейного перемещения LVDT при взаимном износе образца и контртела – характер фрикционного взаимодействия. По результатам испытаний определяли скорость изнашивания образцов по формуле, представленной в работе [18].

Результаты и обсуждение

Образцы из высокоуглеродистой комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали подвергали упрочняющей термической обработке по следующей схеме: закалка при температуре, обеспечивающей практически полное растворение избыточных фаз, и последующий многократный отпуск для снижения доли остаточного аустенита в структуре стали. Для оценки влияния структурных составляющих на триботехнические характеристики исследовали образцы с разной степенью пластической деформации (30, 45 и 80 %) при горячей обработке давлением с целью получения разной степени дисперсности мартенситной структуры при термической обработке. Степень дисперсности мартенсита напрямую зависит от величины аустенитного зерна. Для получения высокого уровня механических характеристик, в особенности контактной выносливости и износостойкости, после закалки необходимо получить структуру со степенью дисперсности от скрыто- до среднеигольчатого мартенсита [19]. Наличие крупноигольчатого мартенсита в микроструктуре детали может способствовать снижению уровня эксплуатационных характеристик изделия из-за его высокой хрупкости [20].



Рис. 1. Микроструктура образцов из теплостойкой подшипниковой стали с мелко- (а), средне- (б) и крупноигольчатым мартенситом (в) после упрочняющей термической обработки

ДюрOMETрические исследования показали, что мартенситная матрица с разной степенью дисперсности обладает идентичными средними значениями твердости (рис. 2).

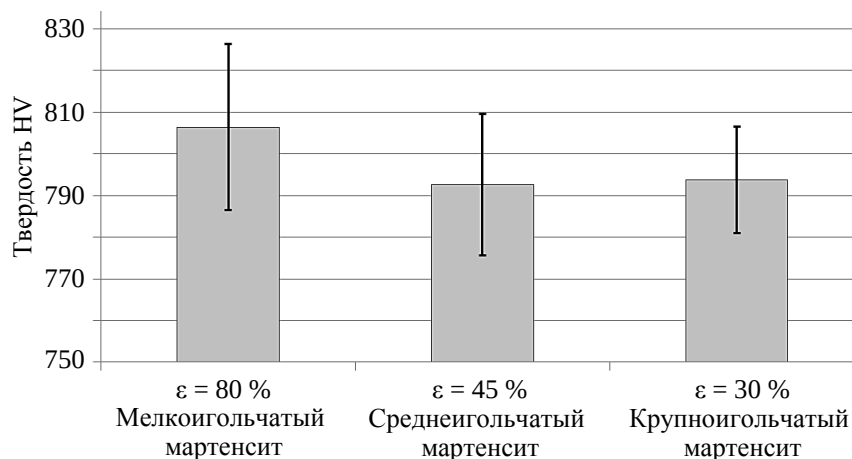


Рис. 2. Твердость образцов из теплостойкой подшипниковой стали с разной степенью пластической деформации ϵ после упрочняющей термической обработки

Исследование структуры методом электронной микроскопии позволило выявить в структуре всех образцов, наряду с мелкодисперсными сферическими карбидами,

крупные избыточные фазы. По результатам рентгеноспектрального микроанализа установлено, что мелкодисперсными сферическими и крупными избыточными фазами являются карбиды специального типа, содержащие молибден, тантал, вольфрам, ниобий и ванадий. Ввиду сложности химического состава исследуемых карбидов для оценки стехиометрического состава использована открытая база данных по существованию химических соединений при нормальных условиях [21].

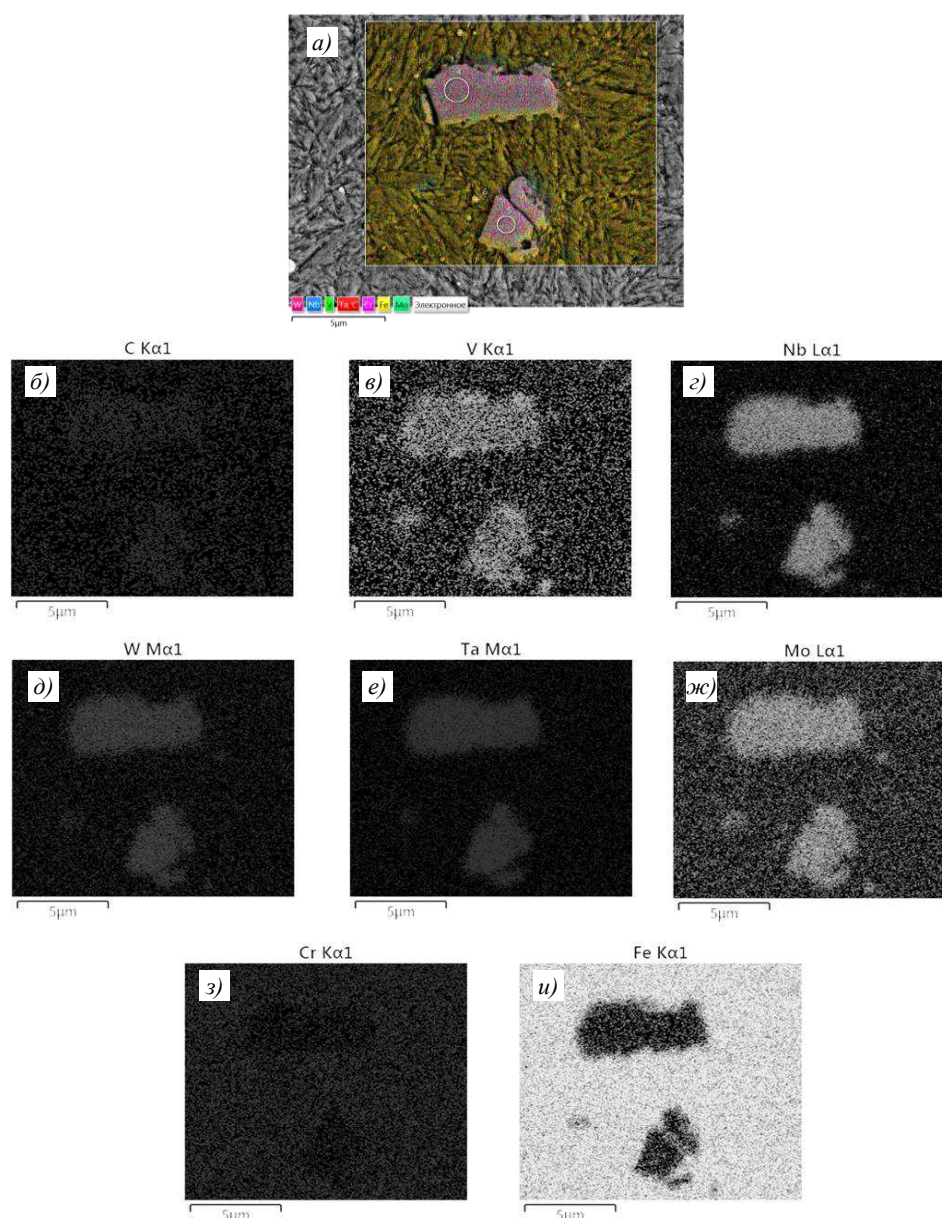


Рис. 3. Электронное изображение структуры (a , $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 80 % и карты энергодисперсионных спектров по химическим элементам: C ($б$), V ($в$), Nb ($з$), W ($д$), Ta ($е$), Mo ($ж$), Cr ($з$) и Fe ($и$)

Металлографическое исследование образца со степенью деформации 80 % и с мелкоигольчатой мартенситной структурой с помощью картирования энергодисперсионных спектров элементов показало, что карбиды легированы практически всеми элементами, кроме хрома и железа (рис. 3). При использовании данных локального химического анализа по соотношению элементов (рис. 4), а также информации с полученного

изображения о детальном строении карбида можно предположить, что при такой системе легирования сформирован комплексный карбид с преобладающей основой $(\text{Ta}, \text{Nb})\text{C}_2$ с тригональной кристаллической решеткой, на поверхности которого и рядом с ним формируются мелкодисперсные карбиды размером <2 мкм следующего стехиометрического состава: $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ – с орторомбической кристаллической решеткой и VC – с кубической кристаллической решеткой. Такое комплексное формирование карбида и его насыщенность легирующими элементами, по-видимому, является причиной того, что базовый карбид имеет размер $\sim(10\text{--}12)$ мкм и остроугольную морфологию. Мелкодисперсные сферические карбиды в мартенситной матрице могут обладать стехиометрическим составом $(\text{Ta}, \text{V})\text{C}_2$ и тригональной кристаллической решеткой, но по основным легирующим элементам доминируют карбиды со стехиометрическим составом $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ с орторомбической кристаллической решеткой, а также с составами VC и Cr_{23}C_6 с кубическими кристаллическими решетками.

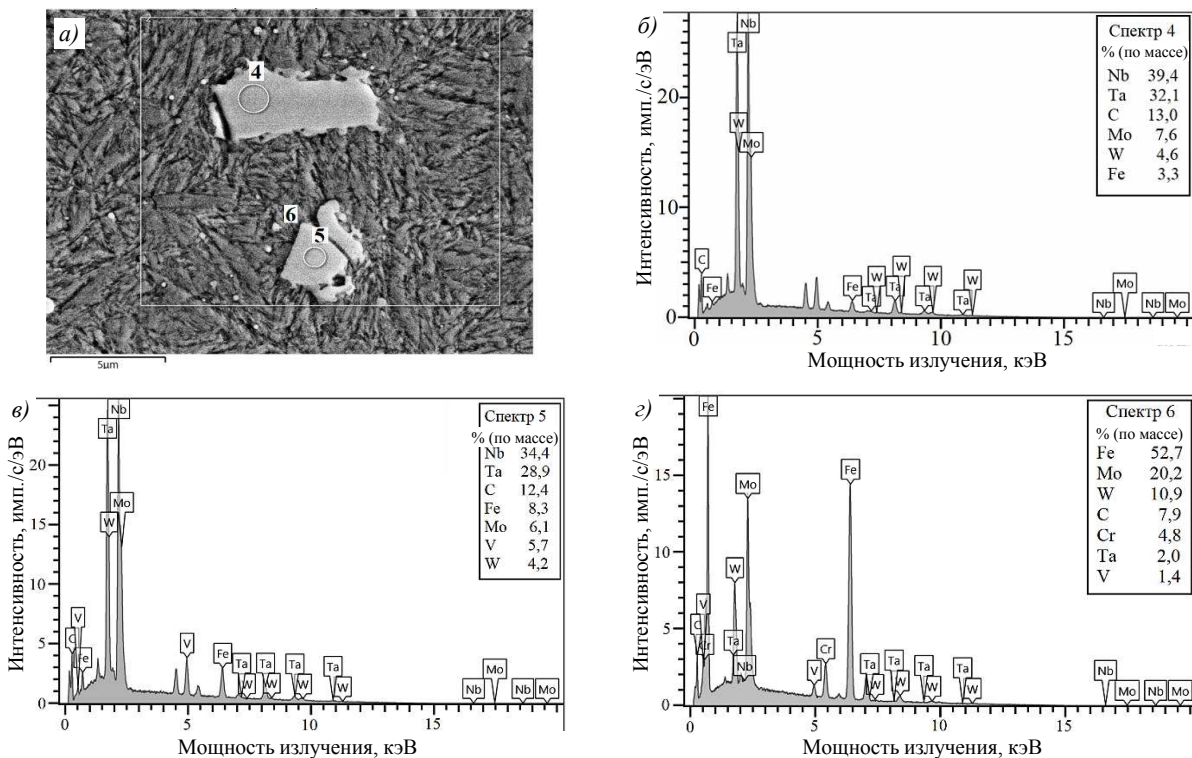


Рис. 4. Электронное изображение структуры (a , $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 80 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: b – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$; v – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ и VC ; z – $(\text{Ta}, \text{V})\text{C}_2$ и $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$

В образце со степенью деформации 45 % и со среднеиглочатой мартенситной структурой присутствуют локальные зоны с угловатыми и вытяженными карбидами размером от 10 до 25 мкм, которые могут являться концентраторами напряжений, а также выкрашиваться, попадая в зону трибоконтакта и выступая в качестве абразивного материала [19]. Аналогичный результат анализа энергодисперсионных спектров (рис. 5) получен на образце со степенью деформации 80 % с некоторыми дополнениями в стехиометрическом составе карбидных фаз. Помимо наличия в структуре карбидов $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ также присутствуют и такие карбиды, как $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ с тригональными кубическими решетками.

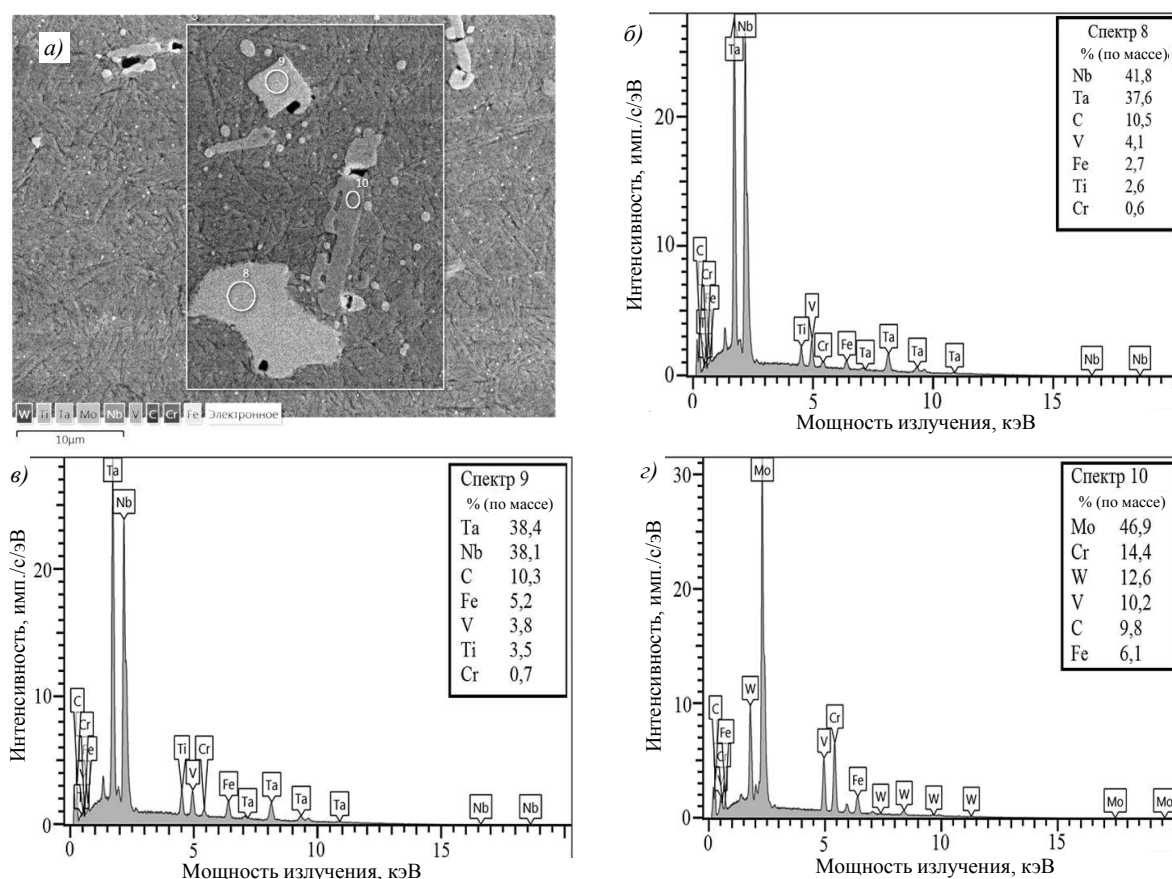


Рис. 5. Электронное изображение структуры (а, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 45 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: б – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; в – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; з – $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ и $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$

Аналогичный результат также получен на образце со степенью деформации 30 % и с крупноигльчатой матрицей. В структуре присутствуют локальные скопления протяженных карбидов угловатой формы размером >10 мкм. При данной степени деформации в структуре наблюдаются все указанные ранее карбиды: $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ (рис. 6). Возможность существования такого скопления карбидов, а также их стехиометрический состав требуют детального изучения, однако по соотношению химических элементов вероятность таких сегрегаций мелкодисперсных карбидов относительно крупной избыточной фазы вполне возможна.

Для исследования износостойкости образцов из комплексно-легированной теплостойкой подшипниковой стали проводили испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения в течение 1 ч. По результатам испытаний установлено, что структура мелкоигльчатого мартенсита обладает более стабильным коэффициентом трения, чем структура средне- и крупноигльчатого мартенсита (рис. 7). Время до выхода на стационарный режим трения для образца с мелкоигльчатым мартенситом составило 8 мин, со среднеигльчатым – около 6 мин, с крупноигльчатым – 2 мин. Увеличение амплитуды колебаний при выходе на стационарный режим свидетельствует о более высокой хрупкости структуры образца, в которой в процессе испытания могут формироваться микросколы и повышаться шероховатость. Такой характер фрикционного взаимодействия наблюдается на образцах со средне- и крупноигльчатым мартенситом. Значительной амплитуды колебаний по коэффициенту трения, связанных с попаданием в зону трибоконтакта абразива в виде выкрошенных карбидов, в процессе испытания не наблюдалось.

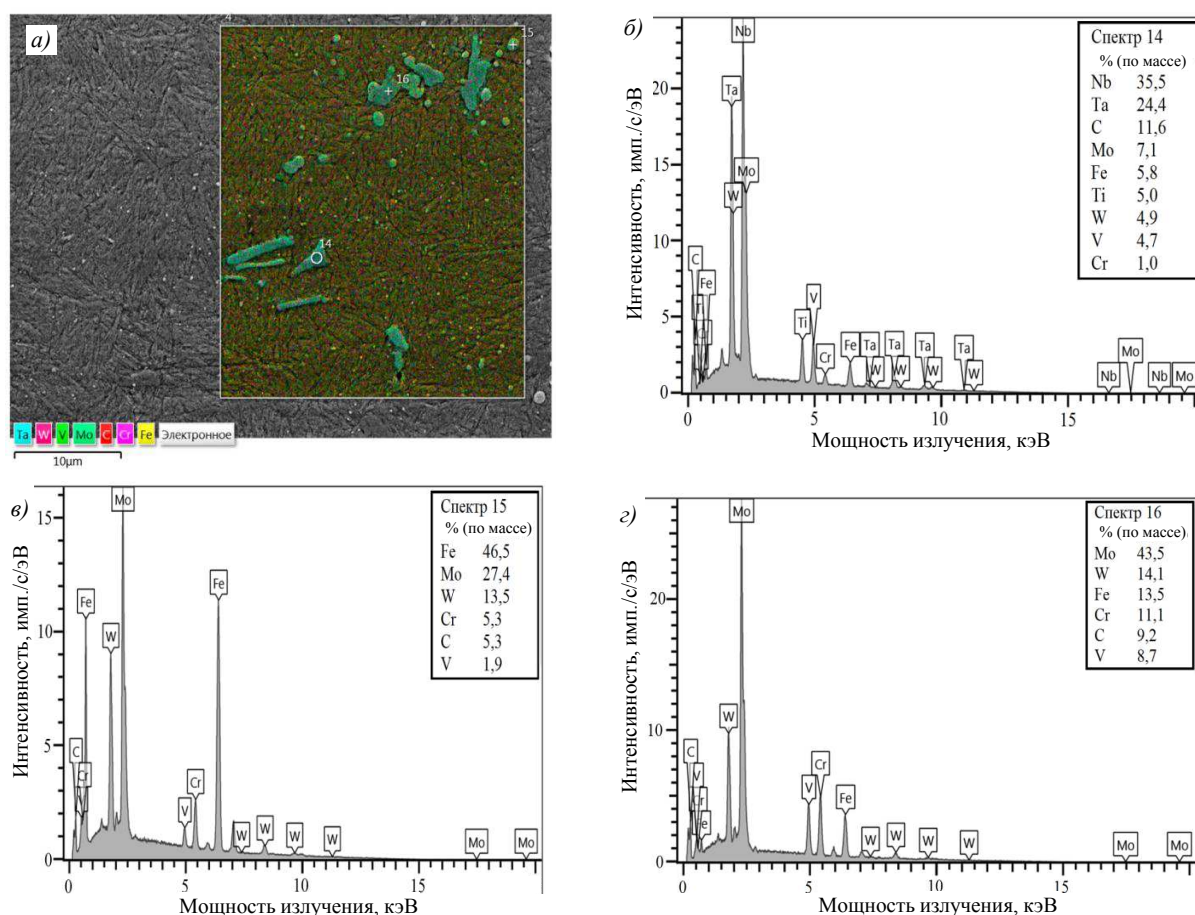


Рис. 6. Электронное изображение структуры (а, $\times 2500$) теплостойкой подшипниковой стали со степенью деформации 30 % и энергодисперсионные спектры характеристического рентгеновского излучения фаз: б – $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$; в, з – $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$ и $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$

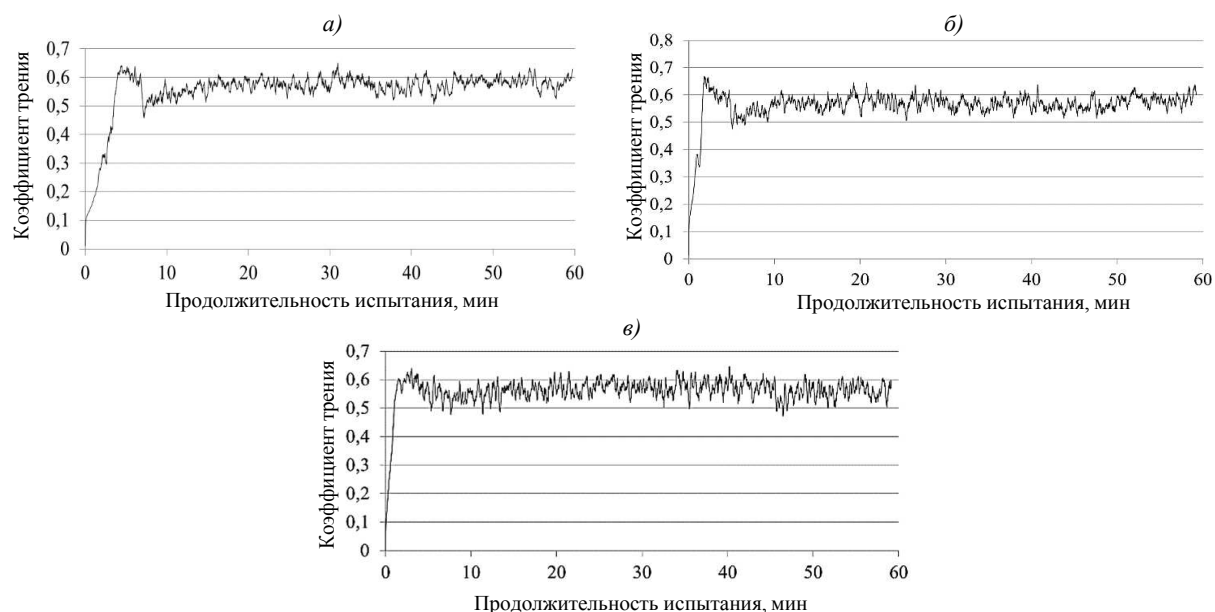


Рис. 7. Изменение коэффициента трения в процессе испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения образцов из теплостойкой подшипниковой стали с мелко- (а), средне- (б) и крупноиглольчатым (в) мартенситом

Результаты измерения скорости изнашивания (рис. 8) также подтвердили, что формирование в структуре мелкоигольчатого мартенсита с избыточными фазами <10 мкм позволяет снизить данный показатель на 50 % по сравнению со среднеигольчатым мартенситом и на 70 % по сравнению с крупноигольчатым.

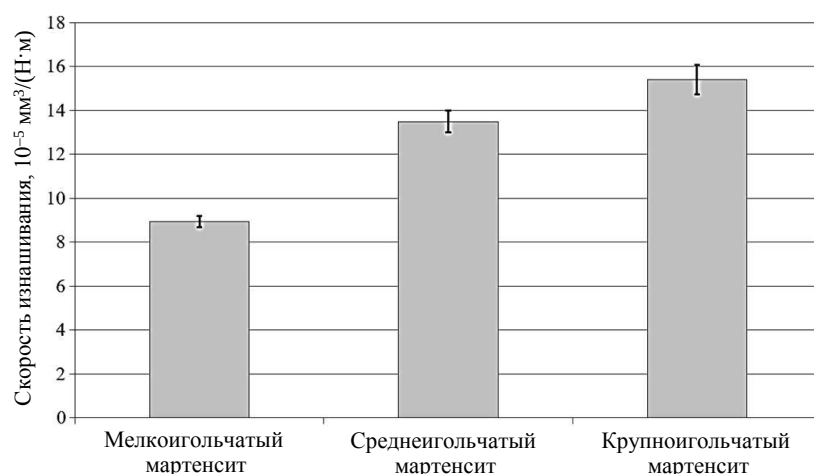


Рис. 8. Скорость изнашивания образцов из теплостойкой подшипниковой стали с различной степенью дисперсности мартенситной структуры

Заключения

Подшипники качения являются ответственными изделиями высоконагруженных узлов машин и механизмов, которые могут работать в условиях циклических нагрузок и интенсивного изнашивания, а также при экстремальных температурах (в диапазоне 350–500 °С). Формирование структуры мартенсита требуемой дисперсности без крупных избыточных фаз в подшипниковых сталях позволяет повысить уровень механических характеристик для обеспечения несущей способности в условиях эксплуатации.

По результатам металлографических исследований микроструктуры высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали установлено, что помимо дисперсности мартенситной структуры степень деформации при горячей обработке давлением влияет на размер и скопление карбидных фаз, но практически не оказывает влияния на среднее значение твердости после упрочняющей термической обработки. После горячей обработки давлением образца со степенью деформации 80 % размер карбидов не превышает 10 мкм; при степени деформации 30 и 45 % размер карбидов находится в диапазоне 10–25 мкм. Ввиду развитой системы легирования в микроструктуре высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали образуются комплексные карбиды, имеющие следующий состав: $(\text{Nb}, \text{Ta})\text{C}_2$, $(\text{Mo}, \text{W})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Ti})\text{C}_2$, $(\text{V}, \text{Cr})\text{C}_2$ и VC. Стехиометрический состав и механизм образования комплексных карбидов в высокоуглеродистой комплексно-легированной подшипниковой стали требуют дальнейшего изучения.

Испытания на изнашивание в условиях сухого трения скольжения по схеме «стержень–диск» позволили установить, что формирование структуры мелкоигольчатого мартенсита и карбидов размером <10 мкм способствует снижению скорости изнашивания на 50 % по сравнению со среднеигольчатым мартенситом и на 70 % по сравнению с крупноигольчатым.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлург*. 2013. № 12. С. 4–8.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
5. Пинегин С.В. Опоры качения в машинах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 150 с.
6. Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Наприенко С.А. Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа // *Труды ВИАМ*. 2016. № 1 (37). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
7. Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Севальнев Г.С. Влияние технологических факторов на эксплуатационную стойкость подшипников из стали ЭИ347-Ш // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 12. С. 43–47.
8. Якушева Н.А. Высокопрочные конструкционные стали для деталей шасси перспективных изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2. С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
9. Спришевский А.И. Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 632 с.
10. Зайцев А.М., Коросташевский Р.В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М.: Транспорт, 1968. 224 с.
11. Контер Л.Я. Стали для теплостойких подшипников (обзор). М.: НИИНАвтопром, 1978. 78 с.
12. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тонышева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Коробова Е.Н., Севальнев Г.С., Громов В.И., Леонов А.В. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
14. Корнеев А.А. Расчет времени нагрева кольца подшипника // *Сборник научных трудов 4-й Междунар. науч.-практ. конф. «Современные инновации в науке и технике»*. Курск, 2014. С. 265–267.
15. Корнеев А.А. Выбор температуры закалки стали ЭИ347-Ш // *Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективное развитие науки, техники и технологий»*. Курск, 2013. С. 157–158.
16. Морозова Л.В. Повреждаемость подшипников качения в процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей // *Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года*. М.: ВИАМ, 2019. С. 175–189.
17. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Metallurgia, 1983. 525 с.
18. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // *Труды ВИАМ*. 2021. № 10 (104). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
19. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Metallurgia, 1980. 264 с.

20. Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали (для подшипников и инструментов). М.: Машгиз, 1963. 384 с.
21. The Materials Project. URL: <http://materialsproject.org> (дата обращения: 10.02.2022).

References

1. 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.
2. Kablov E.N. Without new materials – there is no future. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
3. Kablov E.N. What to make the future from? The materials of the new generation, the technology of their creation and processing are the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Kablov E.N. The materials of the new generation are the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intelлект i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
5. Pinegin S.V. Rolling supports in cars. Moscow: Publishing House of the AS USSR, 1961. 150 p.
6. Orlov M.R., Grigorenko V.B., Morozova L.V., Naprienko S.A. Research of operational damages of bearings by methods of optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 9. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
7. Kotov S.A., Muzafarova S.-V.R., Sevalnev G.S. The influence of technological factors on the operational resistance of bearings from steel EI347-Sh. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2020, no. 12, pp. 43–47.
8. Yakusheva N.A. High-strength constructional steels for landing gears of perspective products of aircraft equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-3-9.
9. Porishevsky A.I. Rolling bearings. Moscow: Mechanical Engineering, 1968, 632 p.
10. Zaitsev A.M., Korostashevsky R.V. Operation of aviation rolling bearings. Moscow: Transport, 1968, 224 p.
11. Conter L.Ya. Steel for heat-resistant bearings (review). Moscow: NIIavtoprom, 1978, 78 p.
12. Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Pokrovskaya N.G., Tonysheva O.A. High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
13. Korobova E.N., Sevalnev G.S., Gromov V.I., Leonov A.V. Steels for the manufacture of roller bearings for special purposes (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
14. Korneev A.A. Calculation of the heating time of the bearing. Modern innovations in science and technology: Proceedings of 4th Int. Scientific and Practical Conf. Kursk: Universitetskaya kniga, 2014, pp. 265–267.
15. Korneev A.A. The choice of hardening temperature became EI347-Sh. Prospective development of science, technology and technology: Materials of 3rd Int. Scientific and Practical Conf. Kursk: Universitetskaya kniga, 2013, pp. 157–158.
16. Morozova L.V. The damage to rolling bearings during the operation of aviation gas turbine engines. The role of fundamental research in the implementation of strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030. Moscow: VIAM, 2019, pp. 175–189.
17. Geller Yu.A. Instrumental steel. Moscow: Metallurgy, 1983, 525 p.
18. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 07, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

19. Spector A.G., Zelbet B.M., Kiseleva S.A. The structure and properties of bearing steels. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p.
20. Rausin Ya.R. Thermal processing of chromium steel (for bearings and tools). Moscow: Mashgiz, 1963, 384 p.
21. The Materials Project. Available at: <https://materialsproject.org> (accessed: February 10, 2022).

Информация об авторах

Севальнёв Герман Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Коробова Елена Николаевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дворецков Роман Михайлович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дорошенко Антон Валерьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Музафарова Светлана-Виктория Рустамовна, инженер-технолог, АО «ОДК-Климов», klimov@klimov.ru

Самойлова Ирина Игоревна, студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauvan@bmstu.ru

Information about the authors

German S. Sevalnev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Elena N. Korobova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman M. Dvoreckov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Svetlana-Victoria R. Muzafarova, Engineer-technologist, JSC «UEC-Klimov», klimov@klimov.ru

Irina I. Samoilova, Student, Bauman Moscow State Technical University, bauvan@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.03.2022.
The article was submitted 15.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 23.03.2022.

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ПСЕВДО- β -ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT47

А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, А.А. Ширяев¹, А.В. Володин², А.В. Братухин²

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

²Акционерное общество «Нормаль», Нижний Новгород, Россия; main@normalnn.ru

Аннотация. Представлены результаты комплекса исследований, включающего анализ микроструктуры, определение механических свойств при воздействии разрушающих нагрузок при разрыве и срезе, а также определение усталостных характеристик при комнатной температуре крепежных изделий из псевдо- β -титанового сплава VT47. Проведен сравнительный анализ полученных результатов исследований, раскрывающий зависимость механических свойств крепежных изделий от структуры. Показана актуальность применения псевдо- β -титанового сплава VT47 в качестве материала для крепежных деталей.

Ключевые слова: псевдо- β -титановые сплавы, крепежные изделия, болты, деформация, холодная высадка, механические свойства, микроструктура, термическая обработка

Для цитирования: Арисланов А.А., Путырский С.В., Ширяев А.А., Володин А.В., Братухин А.В. Исследование структуры и механических свойств крепежных изделий из высокопрочного псевдо- β -титанового сплава VT47 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF FASTENERS MADE OF VT47 HIGH-STRENGTH METASTABLE β -TITANIUM ALLOY

A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹, A.A. Shiryaev¹, A.V. Volodin², A.V. Bratukhin²

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

²Joint Stock Company «Normal», Nizhny Novgorod, Russia; main@normalnn.ru

Abstract. The article presents the results of a complex of studies: analysis of the microstructure, determination of mechanical properties under the influence of breaking loads at break, shear, as well as determination of fatigue characteristics at room temperature of fasteners made of VT47 pseudo- β -titanium alloy. A comparative analysis of the obtained research results was carried out, showing the dependence of the mechanical properties of fasteners on the structure. The relevance of the use of VT47 pseudo- β -titanium alloy as material of fasteners is shown.

Keywords: metastable β -titanium alloys, fasteners, deformation, cold forging, mechanical properties, microstructure, heat treatment

For citation: Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Shiryaev A.A., Volodin A.V., Bratukhin A.V. Study of the structure and mechanical properties of fasteners made of VT47 high-strength metastable β -titanium alloy. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-27-38.

Введение

Вследствие постоянного повышения требований к характеристикам современных изделий авиационной техники существенно возрастают и требования к уровню свойств материалов, используемых в качестве крепежных изделий для соединения элементов конструкций [1–6]. Увеличение объема применения композиционных материалов в конструкции планера самолета создает предпосылки к повышению использования крепежных изделий, изготовленных из титановых сплавов. Это связано с тем, что в контакте с углепластиком коррозия не развивается только на нержавеющей сталях и титановых сплавах [7]. При этом титановые сплавы имеют плотность меньше, чем у сталей, и при условии достижения равных значений прочностных характеристик их применение позволит повысить весовую эффективность конструкции. Сплав ($\alpha + \beta$)-класса BT16, традиционно используемый для изготовления таких деталей крепления, как болты, винты и др., имеет следующий уровень прочностных характеристик: предел прочности $\tau_{cp} \geq 700$ МПа и сопротивление срезу $\sigma_b \geq 1040$ МПа (термически упрочненное состояние). Повысить значения характеристик прочности крепежных изделий можно за счет применения титановых сплавов, химический состав которых позволяет обеспечить более высокий уровень механических свойств в термически упрочненном состоянии [8–14].

Однако следует отметить, что особенностью сплава BT16 является то, что его химический состав позволяет из отожженного прутка, имеющего предел прочности ~ 850 МПа, в холодном состоянии без промежуточных отжигов осуществлять высадку головки болта, редуцирование стержня, а также шлифование и накатывание резьбы. Такая технология производства деталей в 2–3 раза экономичнее классической технологии горячей высадки головки и редуцирования стержня болта. Применение псевдо- β -титановых сплавов позволит повысить прочность крепежных изделий и при этом иметь возможность их изготовления путем холодной высадки. Перспективность данного подхода подтверждается зарубежным опытом, где для изготовления крепежа используют псевдо- β -сплав Timetal 21S (Ti–3Al–15Mo–2,7Nb–0,25Si), обладающий характеристиками прочности следующего уровня: $\tau_{cp} \geq 800$ МПа и $\sigma_b \geq 1300$ МПа [4, 15–25].

Применение для изготовления крепежных изделий перспективного отечественного псевдо- β -титанового сплава BT47 (Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe–Sn–Zr–Y), разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ», содержащего в системе легирования редкоземельный элемент иттрий (Y), с высокой технологической пластичностью, необходимой для использования холодной высадки, способствует достижению требуемого уровня прочностных характеристик, что, в свою очередь, повышает весовую эффективность конструкции современных изделий авиационной техники [19–21, 26].

С целью обеспечения необходимого уровня свойств выбраны режимы термической обработки и схема изготовления крепежных изделий из псевдо- β -титанового сплава BT47, а также проведены их испытания и сравнительный анализ свойств с титановым сплавом BT16 – аналогом по применению.

Материалы и методы

Для изготовления крепежных изделий (болтов), в том числе типа Hi-Lok (соединения с тарированной затяжкой), и проведения исследований использованы прутки диаметром 6,5 и 10,5 мм производства АО «Чепецкий механический завод», г. Глазов (рис. 1). Прутки получены по разработанной технологии изготовления прутков из псевдо- β -титанового сплава BT47 в соответствии с ТУ 430–2021. Данная технология обеспечивает получение прутков, которые в отожженном состоянии имеют значения пластических характеристик, обеспечивающие уровень технологической пластичности при деформации, достаточный для изготовления крепежных изделий холодной высадкой.



Рис. 1. Внешний вид прутков из псевдо-β-титанового сплава BT47 производства АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов)

Изготовленные прутки обладают следующим уровнем механических свойств:

для прутков диаметром 6,5 мм

– в отожженном состоянии относительное удлинение $\delta \geq 23 \%$, относительное сужение $\psi \geq 56 \%$, остаточная деформация при осадке $\geq 70 \%$;

– в термически упрочненном состоянии $\sigma_b \geq 1232$ МПа, $\tau_{ср} \geq 808$ МПа, $\delta \geq 9 \%$, $\psi \geq 26 \%$;

для прутков диаметром 10,5 мм

– в отожженном состоянии $\delta \geq 17 \%$, $\psi \geq 53 \%$, остаточная деформация при осадке $\geq 70 \%$;

– в термически упрочненном состоянии $\sigma_b \geq 1265$ МПа, $\tau_{ср} \geq 803$ МПа, $\delta \geq 9 \%$, $\psi \geq 28 \%$.

Изготовление болтов происходило в промышленных условиях АО «Нормаль» (г. Нижний Новгород) по следующей схеме:

- резка прутков на заготовки под высадку болта;
- нанесение на заготовку технологического покрытия (бор-фторидного). Данная операция включает предварительное травление, нанесение технологического покрытия и омыливание;
- холодная штамповка – основное формообразование болта (высадка головки болта, высадка стержневой части);
- механическая обработка (снятие фаски, проточка головки и т. д.);
- старение в вакуумной печи с целью обеспечения требуемых характеристик изделия;
- обкатка радиуса под головкой, накатка резьбы;
- прошивка шестигранника (для болтов типа Hi-Lok).

Изготовлены три типа болтов из сплава BT47, в том числе типа Hi-Lok (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид болтов из псевдо-β-титанового сплава BT47, изготовленных в промышленных условиях АО «Нормаль» с плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok M10 (а), с уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой M6 (б) и с потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok M6 (в)

Исследование микроструктуры выполняли на оптическом микроскопе Olympus GX51.

Определение фазового состава проводили при помощи дифрактометра Bruker D8 ADVANCE (Германия). Параметры съемки: Cu K α -излучение; фокус трубки 0,5×3 мм; напряжение 40 кВ; ток в трубке 40 мА.

Испытания на растяжение (σ_b) образцов прутков из титанового сплава BT47 осуществляли при температуре 20 °С на испытательной машине Zwick/Roell Z 400 по ГОСТ 1497–84, а испытания на срез ($\tau_{ср}$) – на испытательной машине Zwick/Roell Z 250 в соответствии с ОСТ 1 90148–74.

Испытания на разрыв и на срез болтов из титанового сплава BT47 проводили при температуре 20 °С на испытательной машине Zwick/Roell HA 250 по ОСТ 1 31101–80, на статическую чувствительность к надрезу – по ОСТ 1 90052–72, а на мало-, многоцикловую усталость и усталостную прочность – по ГОСТ 25.502–79.

Результаты и обсуждение

При проведении исследований выбран режим термической обработки (где $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения) прутков в камерной печи Nabertherm [27]: отжиг при температуре ($T_{п.п} - 30$) °С, выдержка, охлаждение на воздухе + старение, выдержка, охлаждение на воздухе.

Данный режим термической обработки выбран как обеспечивающий достижение наилучших значений механических свойств материала прутков. При этом в отожженном состоянии (состояние поставки прутков) сплав обладает высоким уровнем технологической пластичности.

Результаты исследований микроструктуры прутков из сплава BT47 в исходном состоянии и после упрочняющей термообработки по указанному режиму представлены на рис. 3.

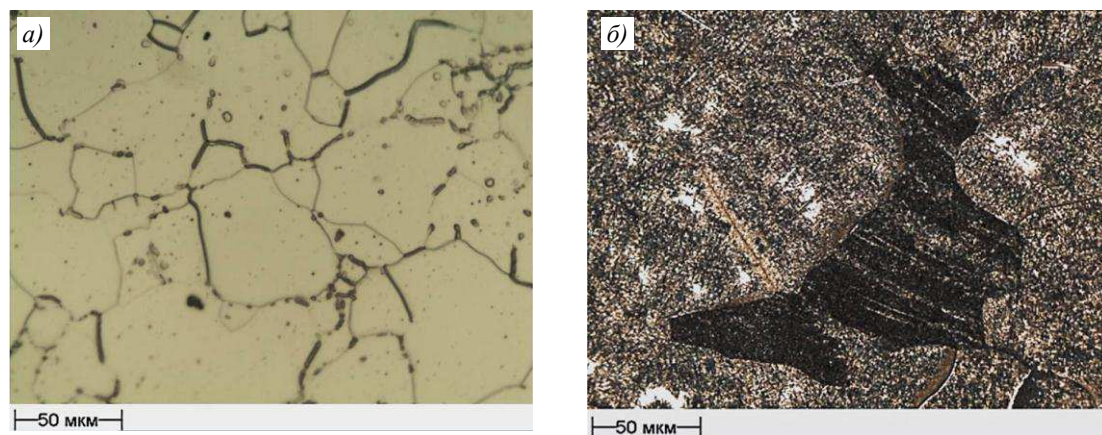


Рис. 3. Микроструктура ($\times 200$) прутков из псевдо- β -титанового сплава BT47 в исходном состоянии (а) и после упрочняющей термической обработки (б)

Микроструктура образцов в термоупрочненном состоянии представлена исходными β -зернами с мелкодисперсными выделениями частиц вторичной α -фазы высокой однородности внутри β -зерна, что обеспечивает повышенный уровень прочностных характеристик.

Результаты испытаний на определение механических свойств при растяжении и сопротивлении срезу прутков из сплавов BT47 и BT16 после упрочняющей термообработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Механические свойства при растяжении и сопротивление срезу прутков
из сплавов ВТ47 и ВТ16 при температуре 20 °С**

Сплав	Режим термической обработки	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Сопротивление срезу $\tau_{ср}$, МПа
ВТ47	Отжиг из $(\alpha + \beta)$ -области + старение	$\frac{1310-1330}{1326}$	$\frac{790-830}{812}$
ВТ16	Закалка + старение	1030–1180	690–720

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

Анализ представленных результатов показывает, что прутки из сплава ВТ47 после упрочняющей термической обработки имеют высокие показатели механических свойств и превосходят по ним прутки из сплава ВТ16.

Повышенные значения прочности при термической обработке с отжигом в высокотемпературной $(\alpha + \beta)$ -области, по-видимому, обусловлено наличием после выдержки и охлаждения первичной α -фазы, а также сохранением дефектов кристаллического строения.

Исследование фазового состава образцов из прутков сплава ВТ47 проводили на дифрактометре фирмы Bruker. На рис. 4 представлена дифрактограмма образцов в закаленном (отжиг из $(\alpha + \beta)$ -области) и термически упрочненном состояниях (отжиг из $(\alpha + \beta)$ -области + старение).

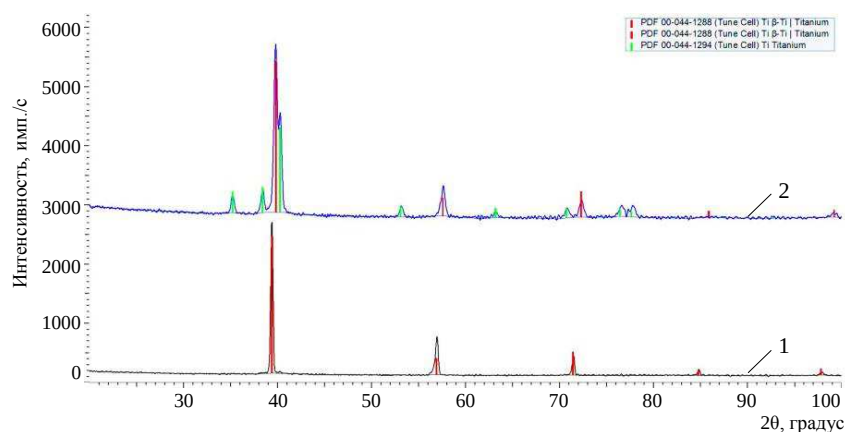


Рис. 4. Дифрактограмма материала образцов-свидетелей болта из псевдо- β -титанового сплава в исходном (1 – отжиг из $(\alpha + \beta)$ -области) и термически упрочненном состояниях (2 – отжиг из $(\alpha + \beta)$ -области + старение)

На дифрактограмме образца в исходном состоянии (отжиг) присутствует линия β -фазы [14], однако отсутствуют линии α -фазы, что характерно для псевдо- β -титановых сплавов в закаленном состоянии. Это свидетельствует о наличии незначительного количества α -фазы в образцах после закалки при температурах, приближенных к $T_{п.п.}$. На дифрактограмме образца в термически упрочненном состоянии (отжиг + старение) присутствуют линии α - и β -фаз, при этом линии дифрактограмм β -фазы образцов в исходном и термически упрочненном состояниях практически совпадают. Присутствие линий α -фазы свидетельствует о том, что в результате старения образуется типичная гетерофазная структура пластинчатого типа: происходит распад метастабильного пересыщенного твердого раствора β -фазы с выделением частиц вторичной α -фазы пластинчатой морфологии, что обеспечивает более высокий уровень прочностных характеристик. Кроме того, несмотря на малое количество первичной α -фазы, ее вклад в повышение

равномерности распада метастабильной β -фазы значителен, о чем можно судить по ранее проведенным исследованиям механических свойств.

Прутки из сплава ВТ47, предназначенные для изготовления крепежных изделий, поставлялись после отжига в высокотемпературной ($\alpha + \beta$)-области. Отличительной особенностью процесса упрочняющей термической обработки крепежных изделий, в сравнении с упрочняющей термической обработкой прутков, является проведение холодной деформации материала путем высадки, после которой осуществляется завершающая термическая обработка. Фактически реализуется схема низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО).

Результаты исследований микроструктуры болтов (центральная зона) из сплава ВТ47 представлены на рис. 5.

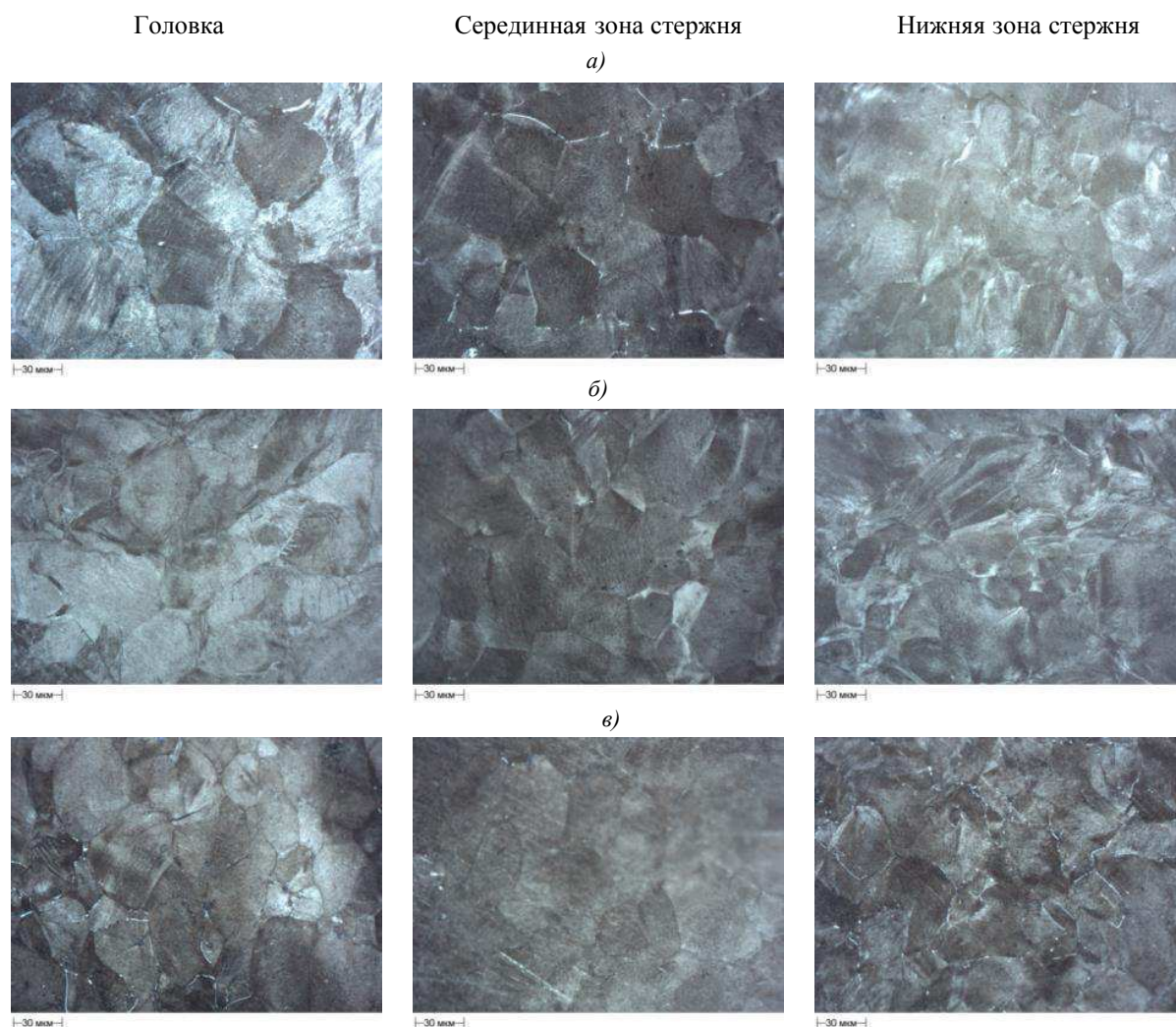


Рис. 5. Микроструктура ($\times 500$) крепежных изделий (болтов) из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 в центральной зоне с уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой М6 (*a*), с потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok М6 (*б*) и с плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok М10 (*в*)

По результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

- микроструктура образцов болтов из сплава ВТ47 представлена исходными β -зернами с мелкодисперсными выделениями частиц вторичной α -фазы высокой однородности внутри β -зерна;

– микроструктура исследованных зон каждого из болтов идентична, размеры и фазовое строение зерен однородное, визуальных дефектов структуры не обнаружено.

В сравнении с микроструктурой прутков после упрочняющей термической обработки следует отметить, что частицы α -фазы внутри β -зерна более мелкопластинчатые, а также имеют преимущественно однонаправленную морфологию. Данная структура характерна для изделий, изготовленных с НТМО, и обеспечивает повышение уровня прочностных характеристик готовых крепежных изделий (болтов).

Пересыщенный β -твердый раствор сплава ВТ47 в состоянии после закалки является механически стабильным, поэтому при холодной деформации во время высадки не происходит выделения α -фазы. Однако возникающие в процессе холодной деформации дефекты кристаллического строения выступают в роли центров зарождения и роста частиц вторичной α -фазы при последующем старении, обеспечивают более однородную структуру болтов и ускоряют процесс распада метастабильной β -фазы. Это, в свою очередь, позволяет достичь стабильного высокого уровня механических свойств и характеристик надежности при повышенных разрушающих нагрузках, что подтверждают результаты проведенных исследований.

Для определения разрушающих нагрузок болтов проведены испытания на разрыв и на срез (в соответствии с ОСТ 1 31101–80), статическую чувствительность к надрезу (в соответствии с ОСТ 1 90052–72), мало- и многоцикловую усталость, а также усталостную долговечность (в соответствии с ГОСТ 25.502–79) на болтах (табл. 2 и 3).

Таблица 2

Разрушающие нагрузки при разрыве и срезе, а также статическая чувствительность к надрезу болтов из псевдо- β -титанового сплава ВТ47*

Вид болта	Разрушающая нагрузка, Н, болтов из сплава				Статическая чувствительность к надрезу болта из сплава ВТ47, Н
	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16	
	при разрыве		при срезе		
С потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok M6	<u>14308–17640</u> 15307	–	<u>25744–25872</u> 25833	–	<u>64680–160720</u> 85750
С уменьшенной шестигранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой М6	<u>28224–30380</u> 28910	<u>17456–19418</u> 18437	<u>25872–26166</u> 25989	<u>17604–19369</u> 18486	<u>96040–147000</u> 117200
С плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok M10	<u>82810–85940</u> 83104	–	<u>118580–123480</u> 120540	–	–
* В числителе – минимальное и максимальное значение, в знаменателе – среднее.					

Конструктивной особенностью крепежных изделий из титановых сплавов является то, что разрушение болтов обычно происходит в самом слабом месте – головке болта. Соответственно, болты с потайной головкой показывают меньшие значения разрушающих нагрузок при разрыве, в сравнении с болтами, имеющими более массивную классическую шестигранную или плоско-скругленную головку.

Результаты испытаний для определения разрушающих нагрузок показывают, что болты из сплава ВТ47 обладают высокими показателями механических свойств в сравнении с аналогичными изделиями из сплава ВТ16.

**Разрушающие нагрузки при мало- и многоцикловой усталости,
а также усталостная долговечность болтов из псевдо- β -титанового сплава ВТ47**

Вид болта	Значения механических свойств, количество циклов					
	МЦУ		МнЦУ		усталостной долговечности	
	болтов из сплава					
	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16	ВТ47	ВТ16
С потайной головкой с углом 120 градусов типа Hi-Lok M6	9442*	8510*	—	—	—	—
С уменьшенной шести-гранной головкой для соединений со специальной переходной посадкой М6	42445**	37534**	83082***	75640***	—	—
С плоско-скругленной головкой и короткой резьбовой частью типа Hi-Lok M10	—	—	—	—	54622****	49610****
* При $P_{\min} = 1362$ МПа, $P_{\max} = 8173$ МПа, $\nu = 1$ Гц (где $P_{\min}$ и $P_{\max}$ – минимальная и максимальная растягивающая нагрузка цикла; ν – частота). ** При $P_{\min} = 1744$ МПа, $P_{\max} = 10476$ МПа, $\nu = 1$ Гц. *** При $P_{\min} = 4371$ МПа, $P_{\max} = 7860$ МПа, $\nu = 30$ Гц. **** При $P_{\min} = 2156$ МПа, $P_{\max} = 2151$ МПа, $\nu = 9$ Гц.						

В целом применение НТМО на прутках из сплава ВТ47 в процессе изготовления крепежных изделий обеспечивает получение структуры материала с мелкопластинчатой α -фазой преимущественно однонаправленной морфологии, что, в свою очередь, обеспечивает достижение повышенного уровня механических свойств, таких как временное сопротивление и сопротивление срезу.

Заключения

Используемые прутки из псевдо- β -титанового сплава ВТ47, поставляемые в закаленном состоянии, обеспечивают достижение высокой степени деформации в холодном состоянии и позволяют реализовать возможность применения схемы, предусматривающей холодную высадку материала при изготовлении крепежных изделий (болтов).

В процессе старения прутков из данного сплава происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением частиц вторичной α -фазы, что подтверждается результатами проведенного качественного рентгеноструктурного анализа (рис. 2). Уровень прочности материала при растяжении, в первую очередь, определяется полнотой протекания процесса распада метастабильной β -фазы и равномерностью получаемого структурно-фазового состояния, что обусловлено реализацией доминирующего дисперсионного механизма упрочнения образцов из сплава ВТ47.

Помимо положительного влияния первичной α -фазы на распад метастабильной β -фазы в процессе старения следует отметить и благотворное влияние на свойства дефектов кристаллического строения и размера зерен β -фазы, наследуемых после холодной деформации при изготовлении прутков.

При учете влияния дефектов строения материала на процессы распада и значений механических свойств становится очевидно, что повышение прочности материала из сплава ВТ47 происходит за счет проведения операций холодной высадки, которая ограниченно применяется для высокопрочных ($\alpha + \beta$)-сплавов вследствие их невысокой

технологической пластичности при комнатной температуре. Однако повышенная технологическая пластичность закаленных псевдо- β -сплавов открывает широкие возможности для реализации данного метода, что подтверждается достижением высокого уровня механических и эксплуатационных свойств.

В результате проведенных исследований установлено, что применение операции холодной высадки на прутках из титанового сплава ВТ47 в процессе изготовления крепежных изделий обеспечивает получение структуры материала с мелкопластинчатой α -фазой преимущественно однонаправленной морфологии, что способствует реализации комплекса высоких механических свойств, таких как временное сопротивление и сопротивление срезу. Применение сплава ВТ47 для изготовления крепежных изделий (болтов) обеспечивает повышение их предела прочности более чем на 200 МПа в сравнении с применяемым в настоящее время для аналогичных целей сплавом ВТ16 с уровнем предела прочности ≥ 1040 МПа в термически упрочненном состоянии.

Следует отметить, что результаты проведенных испытаний и анализ полученных данных показали следующее: крепежные изделия (болты), изготовленные из титанового сплава ВТ47, выдерживают при разрыве и срезе более высокие нагрузки – до ~40 и ~50 % соответственно (по сравнению с аналогичными деформационно-упрочненными изделиями из титанового сплава ВТ16), а также до ~20 % при разрыве и срезе по сравнению с аналогичными термоупрочненными изделиями из титанового сплава ВТ16). Это объясняется более высоким уровнем прочности сплава ВТ47 после окончательной термической обработки по сравнению со сплавом ВТ16.

Добиться дополнительного повышения уровня разрушающих нагрузок крепежных изделий (болтов) возможно за счет оптимизации процесса их производства, направленной на повышение механических характеристик в самом слабом месте изделия – зоне головки крепежных изделий (болтов).

Возможность достижения высоких значений прочностных характеристик в совокупности с высокой технологической пластичностью делает актуальным применение псевдо- β -сплава ВТ47 в качестве материала крепежных деталей.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. 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.
4. Власов А.П. Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.
5. Володин В.А. Крепежные системы для высоконагруженных авиационных конструкций. Опыт и перспективы применения в гражданских самолетах // Международная энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. М: НИЦ АСК, 2015. С. 125–128.
6. Володин В.А., Братухин В.А. Технологические особенности изготовления крепежных систем для соединения композиционных материалов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2 (117). С. 113–117.
7. 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.
8. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.

9. Ночовная Н.А. Исследование влияния параметров изотермической деформации и термической обработки на структуру и механические свойства штамповки из сплава ВТ6ч. // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-3-3.
10. Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности // Технология легких сплавов. 1993. № 7–8. С. 47–54.
11. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
12. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИС-МАТИ, 2009. 520 с.
13. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 12. С. 11–14.
14. Колачев Б.А., Садков В.В., Талалаев В.Д. Вакуумный отжиг титановых конструкций. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
15. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 513 p.
16. Whittaker J.T. Ductility and Use of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners: Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. University of South Florida, 2015. 91 p.
17. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
18. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 148 с.
19. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry // Journal of Materials Engineering and Performance. 2005. Vol. 14 (6). P. 681–685.
20. Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
21. Панин П.В., Лукина Е.А., Алексеев Е.Б. Влияние легирования водородом на структуру и фазовый состав листовых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-49-57.
22. Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Влияние легирования водородом на технологическую пластичность и текстуру листовых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ23 // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68.
23. Santhosh R., Geetha M., Nageswara Rao M. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017. Vol. 70 (7). P. 1681–1688.
24. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners // Titanium-92 Science and Technology: Proceedings of the 7th World Conference on Titanium. Denver: Minerals, Metals & Materials Society, 1993. P. 2899–2906.
25. Золоторевский В.С. Механические свойства материалов: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
26. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical. 2014. Report No. 106. P. 22–27.
27. Дуюнова В.А., Путырский С.В., Арисланов А.А., Крохина В.А., Ширяев А.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства прутков из сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.

References

1. Kablov E.N. Dominant of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia. *Metally Evrazii*, 2017, no. 3, pp. 2–6.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. 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.
4. Vlasov A.P. Progressive fasteners. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 256 p.
5. Volodin V.A. Fastening systems for highly loaded aircraft structures. Experience and prospects for use in civil aircraft. *CALS International Encyclopedia. Aerospace engineering*. Moscow: NITs ASK, 2015, pp. 125–128.
6. Volodin V.A., Bratukhin V.A. Technological features of the manufacture of fastening systems for joining composite materials. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva*, 2017, no. 2 (117), pp. 113–117.
7. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryayev A.A., Novak A.V. A practical guide to the metallography of alloys based on titanium and its intermetallic compounds: textbook. allowance. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
8. Lyasotskaya V.S. Heat treatment of welded joints of titanium alloys. Moscow: Ecomet, 2003. 352 p.
9. Nochovnaya N.A. Research of the influence of parameters of isothermal deformation and heat treatment on structure and mechanical properties punchings from alloy VT6ch. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 03, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-10-3-3.
10. Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation technology and other industries. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 1993, no. 7–8, pp. 47–54.
11. Glazunov S.G., Moiseev V.N. Structural titanium alloys. Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
12. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
13. Moiseev V.N. Beta-titanium alloys and prospects for their development. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
14. Kolachev B.A., Sadkov V.V., Talalaev V.D. Vacuum annealing of titanium structures. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 224 p.
15. Leyens C., Peters M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, 2003, 513 p.
16. Whittaker J.T. Ductility and Use of Titanium Alloy and Stainless Steel Aerospace Fasteners: Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. University of South Florida, 2015, 91 p.
17. Birger I.A., Iosilevich G.B. Threaded and flange connections. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 368 p.
18. Kolganov I.M., Dubrovsky P.V., Arkhipov A.N. Manufacturability of aircraft structures, ways to improve. Part 1: textbook. Ulyanovsk: UIGTU, 2003, 148 p.
19. Boyer R.R., Briggs R.D. The Use of β Titanium Alloys in the Aerospace Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2005, vol. 14 (6), pp. 681–685.
20. Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM's contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
21. Panin P.V., Lukina E.A., Alekseev E.B. Effect of hydrogen doping on structure and phase composition of sheet semi-products of VT23 titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-49-57.
22. Panin P.V., Dzunovich D.A., Lukina E.A. Effect of hydrogen doping on processing ductility and texture of sheet semi-products of VT23 titanium alloy. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-58-68.

23. Santhosh R., Geetha M., Nageswara Rao M. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, vol. 70 (7), pp. 1681–1688.
24. Bania P.J., Hutt A.J., Adams R.E. Ultra high strength titanium alloy for fasteners. Titanium-92 Science and Technology: Proceedings of the 7th World Conference on Titanium. Denver: Minerals, Metals & Materials Society, 1993, pp. 2899–2906.
25. Zolotarevsky V.S. Mechanical properties of materials: a textbook for universities. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p.
26. Inagaki I., Shirai Y., Takechi T., Ariyasu N. Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical, 2014, report no. 106, pp. 22–27.
27. Duyunova V.A., Putyrskiy S.V., Arislanov A.A., Krokhnina V.A., Shiryaev A.A. Analysis of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of bars made of VT47 titanium alloy. Aviation materials and technologies, 2021, no. 4 (65), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 03, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.

Информация об авторах

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

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

Ширяев Андрей Александрович, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Володин Анатолий Вячеславович, генеральный директор, АО «Нормаль»; main@normalnn.ru

Братухин Анатолий Владиславович, главный конструктор, к.т.н., АО «Нормаль»; main@normalnn.ru

Information about the authors

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

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

Anatoly V. Volodin, Director General, JSC «Normal», main@normalnn.ru

Anatoly V. Bratukhin, Chief Designer, Candidate of Sciences (Tech.), JSC «Normal», main@normalnn.ru

Статья поступила в редакцию 28.02.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.03.2022.

The article was submitted 28.02.2021; approved and accepted for publication after reviewing 09.03.2022.

Научная статья

УДК 621.792.053

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-39-48

ВЛИЯНИЕ АДГЕЗИОННОГО ГРУНТА ЭП-0234 НА СВОЙСТВА КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛЕЯ ВК-36*А.П. Петрова¹, Н.Ф. Лукина¹, А.Ю. Исаев¹, О.И. Смирнов¹*

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

Аннотация. Показано, что применение эпоксидного грунта ЭП-0234, используемого в качестве адгезионного подслоя под эпоксидно-полисульфоновым клеем ВК-36, приводит к увеличению продолжительности выдержки между процессом химического оксидирования в хромовой кислоте (Ан.Окс.хром) склеиваемых поверхностей и началом технологических работ по склеиванию до 30 сут (вместо 2 сут для анодированных поверхностей без грунта) без ухудшения показателей свойств склеенных образцов, а в некоторых случаях – с их улучшением.

Ключевые слова: пленка клея, адгезионный грунт, прочность клеевых соединений, термическое старение, устойчивость к влаге, воздействие вибрации, длительная прочность

Для цитирования: Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю., Смирнов О.И. Влияние адгезионного грунта ЭП-0234 на свойства клеевых соединений, полученных с применением клея ВК-36 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-39-48.

Scientific article

THE EFFECT OF THE ADHESIVE PRIMER EP-0234 ON THE PROPERTIES OF ADHESIVE COMPOUNDS OBTAINED USING ADHESIVE VK-36*A.P. Petrova¹, N.F. Lukina¹, A.Yu. Isaev¹, O.I. Smirnov¹*

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

Abstract. It is shown that the use of EP-0234 epoxy primer, used as an adhesive sublayer under VK-36 epoxy-polysulfone adhesive leads to an increase in the holding time between the process of chemical oxidation in chromic acid (An.Ox.chrome) of the glued surfaces of aluminum alloys and the start of technological bonding work for up to 30 days (instead of 2 days for anodized surfaces without primer) without deterioration of the glued samples, and in some cases – to their improvement.

Keywords: adhesive film, adhesive primer, strength of adhesive joints, thermal aging, resistance to moisture, vibration, long-term strength

For citation: Petrova A.P., Lukina N.F., Isaev A.Yu., Smirnov O.I. The effect of the adhesive primer EP-0234 on the properties of adhesive compounds obtained using adhesive VK-36. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-39-48.

Введение

В авиастроении широко используют алюминиевые сплавы при производстве клеевых конструкций благодаря их высокой коррозионной стойкости и удельной

прочности при невысокой, по сравнению с другими металлами, плотностью. Основным технологическим приемом, который используется в авиастроении, является химический способ обработки поверхности алюминиевых сплавов перед склеиванием, заключающийся в химическом оксидировании этих металлов в хромовой кислоте (анодное оксидирование), благодаря чему, с одной стороны, удастся обеспечить их коррозионную защиту, а с другой – повысить стабильность прочностных показателей клееных материалов в условиях воздействия окружающей среды и эксплуатационных нагрузок [1, 2].

При многих положительных характеристиках анодного оксидирования ограничением для его применения является небольшой срок активности анодной пленки, поскольку при хранении в воздушной среде она быстро теряет свои адгезионные свойства. В связи с этим интервал времени между технологическим приемом анодирования и началом технологического процесса склеивания не должен превышать 2 сут [3].

Для увеличения интервала времени между химической обработкой в хромовой кислоте (с целью получения анодного покрытия (Ан.Окс.хром)) и началом работ по склеиванию предварительно (но не более 2 ч после процесса анодирования) на подлежащие склеиванию поверхности алюминиевых сплавов наносится адгезионный грунт ЭП-0234, а затем проводят его отверждение при температуре 125 ± 5 °С. Функции адгезионного грунта в клеевом соединении заключаются в следующем [4–7]:

- до нанесения клея на склеиваемые поверхности грунт предотвращает загрязнение поверхностей, подготовленных под склеивание, в процессе промежуточных технологических операций, а также при их транспортировке и хранении;

- способствует увеличению интервала времени между технологическими этапами, в ходе которых сначала подготавливают поверхности под склеивание, а затем производят их склеивание; в результате повышается производительность труда за счет увеличения количества деталей, для которых одновременно выполняется операция по подготовке поверхности;

- предварительное нанесение адгезионного грунта способствует достижению лучшей смачиваемости склеиваемой поверхности клеем, так как грунт в своем составе содержит специальные функциональные добавки;

- наличие адгезионного грунта на поверхности алюминиевых сплавов способствует защите поверхности металлов от коррозии из-за содержания в его составе соединений хрома, являющихся ингибиторами коррозии;

- грунт, нанесенный на поверхность анодированного металла, заполняет поры в анодном покрытии, благодаря чему снижается возможность диффузии влаги, которая может проникать по торцам клеевого шва;

- клеевые соединения имеют более высокую водостойкость и трещиностойкость, поскольку клеевой слой на границе «клей–субстрат», как показали исследования, является более монолитным [8].

При использовании грунта ЭП-0234 в технологическом процессе склеивания клеем ВК-36 его концентрация должна составлять 11 ± 1 % (по массе). На поверхности его наносят способом пневматического распыления (краскораспылителем) аналогично нанесению лакокрасочных покрытий.

В результате, за счет нанесения грунта на предварительно анодированную поверхность металла, существенно (с 2 до 30 сут) увеличивается время хранения деталей до начала процесса склеивания [9].

В данной статье представлены результаты исследований, показывающие влияние грунта марки ЭП-0234 на показатели характеристик стандартных образцов, склеенных с использованием клеящей пленки марки ВК-36.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий переработки на период до 2030 года») [10–12].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований использована пленка клеевая марки ВК-36 на основе эпоксидной смолы, модифицированной полисульфоном, рекомендованная для соединения элементов конструкций из металлических и полимерных композиционных материалов, в том числе сотовых конструкций, работающих в интервале температур от -130 до $+160$ °С.

В качестве клеевого подслоя под нанесение клея ВК-36 применялся адгезионный грунт ЭП-0234 желтого цвета (ТУ 1-595-24-501–97). Содержание основного вещества в рецептуре грунта составляло от 55 до 60 %, степень перетира – не более 25 мкм [13, 14].

Перед применением грунт разбавляли с целью достижения рабочей концентрации 11 ± 1 % путем введения растворителя.

Использовали следующие методы исследований:

- клеящие свойства при сдвиге оценивали по ГОСТ 14759–91;
- клеящие свойства при отслаивании оценивали по РТМ 1.2А.015–99;
- влияние условий камеры тропиков исследовали по СТП 1-595-20-100–2002;
- оценку влияния длительной нагрузки на прочность и выносливость клеевых соединений проводили по РТМ 1.2А.015–99.

Результаты и обсуждение

С целью оценки изменения показателей прочностных характеристик клеевых соединений стандартных образцов под влиянием предварительно нанесенного адгезионного грунта ЭП-0234 с использованием клея ВК-36 изготовлена серия образцов для проведения испытаний в условиях воздействия нагрузок различного вида, после чего выполнены их испытания. При этом часть образцов изготовлена на анодированных образцах без грунта, а вторая часть – с дополнительным предварительным нанесением адгезионного грунта ЭП-0234. Показатели испытаний прочностных характеристик клеевых соединений после воздействия условий экспозиций различного вида в сравнении с контрольными образцами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства клеевых соединений при различных видах испытания

Свойства	Склеиваемые материалы	Подготовка поверхности	Значения свойств при температуре испытания, °С				
			–130	–60	20	150	160
τ_b , МПа	Сплав Д19-АТ	Ан.Окс.хром	29,5	33,5	37,5	25,5	15,5
		Ан.Окс.хром + ЭП-0234	29,5	32,5	35,5	26,0	17,5
$S_{рассл}$, кН/м		Ан.Окс.хром	2,1	3,4	2,5	2,3	2,2
		Ан.Окс.хром + ЭП-0234	2,0	3,1	2,7	2,7	1,7
$\sigma_{отр}$, МПа	Сплав Д19-АТ + сотовый заполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	Ан.Окс.хром	7,8	8,5	8,7	2,7	2,0
		Ан.Окс.хром + ЭП-0234	7,8	8,7	8,6	3,7	2,2
$M_{отд}$, кДж/м		Ан.Окс.хром	5,5	10,0	8,5	8,0	7,2
		Ан.Окс.хром + ЭП-0234	–	7,0	7,0	10,0	9,7

Данные, представленные в табл. 1, показывают, что в зависимости от температуры и вида испытаний получены различные результаты по влиянию адгезионного грунта на значения характеристик клеевых соединений. Для образцов клеевых соединений закрытого типа установлено, что показатели, характеризующие прочностные свойства в условиях сдвиговых нагрузок (τ_b), при температурах испытания -130 и -60 °С в сравнении с показателем при 20 °С снижаются незначительно; при температурах 150 и 160 °С имеет место более существенное снижение прочности. Показатели, характеризующие прочностные свойства в условиях воздействия расслаивающих нагрузок ($S_{\text{рассл}}$), в процессе испытаний при температурах -130 , 20 и 150 °С изменяются незначительно и остаются в пределах от $2,0$ до $2,7$ кН/м; при температуре -60 °С имеет место некоторое повышение значения данного показателя до $3,1$ – $3,4$ кН/м. Следует отметить существенное снижение данного показателя для образцов с грунтом при температуре 160 °С. Результаты испытаний образцов сотовой конструкции при равномерном отрыве ($\sigma_{\text{отр}}$) и методом поднимающегося барабана ($M_{\text{отд}}$), представленные в табл. 1, показывают характер изменения прочностных показателей в интервале температур от -60 до $+150$ °С.

Результаты испытаний, представленные в табл. 2, демонстрируют сравнение показателей прочностных характеристик образцов, изготовленных как без грунта, так и с использованием грунта и склеенных с применением клея ВК-36, при воздействии на них температур, превышающих 20 °С.

Таблица 2

**Механические свойства клеевых соединений
после выдержки при повышенных температурах**

Свойства	Склеиваемые материалы (подготовка поверхности)	Условия выдержки: температура, °С/ продолжительность, ч	Значения свойств при температуре испытания, °С				
			−130	−60	20	150	160
τ _в , МПа	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	В исходном состоянии*	–	–	37,0	25,0	–
		150/5000	–	–	30,0	20,0	–
		В исходном состоянии*	29,5	33,5	35,5	26,5	17,5
		160/1000	15,5	–	28,5	–	15,5
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии	29,5	33,5	35,5	26,5	17,5
		150/500	–	20,5	32,0	28,5	–
		150/1000	–	30,5	33,5	31,5	–
		150/5000	–	–	30,0	24,5	–
160/1000	15,5	–	28,5	–	15,5		
S _{рассл} , кН/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии	–	2,9	2,4	3,4	–
		150/500	–	3,1	2,6	3,0	–
		150/1000	–	2,1	2,5	3,3	–
		150/5000	–	–	2,5	3,3	–
M _{отд} , кДж/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии	5,5	10,0	8,5	8,0	7,2
		150/1000	–	6,0	8,5	6,5	–
		160/1000	5,0	–	8,0	–	6,5
		То же + ЭП-0234	–	7,0	7,0	10,0	7,0
		–	4,0	7,0	8,0	–	

* Испытание образцов из разных партий клея.

* Испытание образцов из разных партий клея.

Анализ данных, содержащихся в табл. 2, показывает, что использование предварительного нанесения на образцы грунта ЭП-0234 с последующим использованием клея ВК-36 не сказывается отрицательно на изменении уровня показателей прочности образцов при сдвиге после воздействия на них термического старения при температурах: 150 °С в течение 5000 ч и 160 °С в течение 1000 ч. Следует отметить, что нанесение грунта способствует повышению показателей прочностных свойств склеенных образцов после выдержки в условиях воздействия термостарения по режиму 150 °С в течение 5000 ч в процессе их испытания при 150 °С – с 20,0 до 24,5 МПа.

Термостарение по режиму 150 °С в течение 5000 ч практически не вызывает снижения показателей прочностных характеристик склеенных образцов при воздействии расслаивающей нагрузки [15–17].

В табл. 3 содержатся данные испытаний склеенных клеем ВК-36 образцов, изготовленных как с предварительным нанесением грунта ЭП-0214, так и без него, после выдержки в воде продолжительностью 30 сут.

Таблица 3

Механические свойства клеевых соединений после воздействия воды в течение 30 сут

Свойства	Склеиваемые материалы (подготовка поверхности)	Условия экспозиции	Значения свойств при температуре испытания, °С			
			–130	–60	20	150
τ_b , МПа	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	В исходном состоянии После воздействия воды	29,5 24,5	33,5 29,5	36,0 30,5	25,5 21,5
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии После воздействия воды	29,5 27,0	33,0 31,0	35,5 29,5	26,0 22,5
$S_{распл}$, кН/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	В исходном состоянии После воздействия воды	1,5 1,5	3,4 3,6	2,9 2,0	2,5 2,0
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии После воздействия воды	2,0 –	3,1 2,5	2,7 2,3	2,7 2,1
$\sigma_{отр}$, МПа	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии После воздействия воды	8,0 8,0	8,5 8,0	8,5 7,0	3,5 4,0
$M_{отд}$, кДж/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии После воздействия воды	5,5 –	10,0 10,0	8,5 8,1	9,0 8,0
	То же + ЭП-0234	В исходном состоянии После воздействия воды	– –	7,0 7,0	7,0 6,0	10,0 8,0

Результаты испытаний, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что грунт ЭП-0234, защищающий соединяемые поверхности под склеивание клеем ВК-36, вызывает незначительное снижение показателей прочностных характеристик при сдвиге для контрольных склеенных образцов. В то же время установлено, что показатели прочности при сдвиге для этих же образцов с грунтом после их выдержки в воде в течение 30 сут, превышают аналогичные показатели для клеевых соединений, изготовленных без применения грунта. Исключение составляют показатели прочности для образцов, испытанных при 20 °С, так как при этой температуре показатели прочности незначительно снижаются (на ~3 %).

Прочность клеевых соединений на клее ВК-36 при расслаивании в случае применения грунта ЭП-0234 незначительно снижается, но после воздействия воды в течение 30 сут прочность при расслаивании для образцов с грунтом практически во всех случаях превышала аналогичные показатели для образцов без грунта.

В табл. 4 приведены результаты испытаний клеевых соединений после выдержки в условиях воздействия искусственного тропического климата в течение 30 и 90 сут.

Таблица 4

**Механические свойства клеевых соединений
после выдержки в камере тропического климата**

Свойства	Склеиваемые материалы (подготовка поверхности)	Условия экспозиции	Значения свойств при температуре испытания, °C			
			–130	–60	20	150
τ_b , МПа	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	В исходном состоянии	29,5	–	36,0	–
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	24,0	–	31,5	–
		90	19,0	–	27,0	–
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии	29,5	32,5	35,5	26,0
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	–	30,5	32,5	21,5
		90	20,5	26,5	29,5	16,5
$S_{рассл}$, кН/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	В исходном состоянии	1,8	3,0	2,9	2,5
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	1,6	3,0	3,0	1,9
		90	1,5	2,9	2,0	1,2
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	В исходном состоянии	2,0	3,1	2,7	2,7
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	–	2,5	2,2	2,0
		90	–	3,0	2,4	1,9
$\sigma_{отр}$, МПа	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии	8,0	8,5	8,5	3,5
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	8,0	6,5	7,0	4,5
		90	7,5	6,0	7,0	3,5
$M_{отд}$, кДж/м	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии	–	10,0	8,5	9,0
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	–	10,0	8,0	10,0
		90	–	10,0	9,0	9,0
	Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234) + сотовый наполнитель из фольги марки АМг2Н толщиной 0,05 мм с ячейкой 2,5 мм	В исходном состоянии	–	7,0	7,0	10,0
		В камере тропического климата в течение, сут:				
		30	–	8,0	8,0	9,7
		90	–	7,0	8,0	9,0

Анализ представленных в табл. 4 результатов показывает, что влияние грунта ЭП-0234 на исходную прочность клеевых соединений и после длительного воздействия искусственного тропического климата аналогично воздействию воды.

Прочность при сдвиге клеевых соединений, выполненных без применения грунта ЭП-0234, после выдержки в искусственных тропических условиях в течение 90 сут снизилась на 25 %, а с грунтом – на 10,7 %.

После выдержки в аналогичных условиях образцов клеевых соединений без грунта для испытания при расслаивании ($S_{\text{рассл}}$) при температуре испытания 20 °С их прочность после воздействия искусственных тропических условий в течение 90 сут снизилась на 31 %, а клеевых соединений, изготовленных с использованием грунта ЭП-0234, в аналогичных условиях – на 11 % [17, 18].

Для соединений сотовой конструкции во всех случаях имело место разрушение по сотовому заполнителю и определялось прочностью фольги АМг2Н, толщина которой составляла 0,05 мм.

В табл. 5 приведены данные по изменению прочности при сдвиге клеевых соединений при циклическом воздействии на них переменных температур.

Таблица 5

**Прочность при сдвиге клеевых соединений
после циклического воздействия переменных температур**

Режим цикла		Количество циклов	Склеиваемые материалы (подготовка поверхности)	τв, МПа, при температуре испытания, °С		
продолжительность воздействия	температура, °С			–60	20	150
В исходном состоянии			Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	30,0	37,5	26,0
3 ч	–60	30		30,0	32,5	23,5
3 ч	150					
18 ч	20–25					
В исходном состоянии			Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром)	29,5	35,5	15,5
20 мин	–130	100		27,5	31,5	12,5
30 мин	20					
30 мин	160					
30 мин	20					
В исходном состоянии			Сплав Д19-АТ (Ан.Окс.хром + ЭП-0234)	29,5	35,5	17,5
20 мин	–130	100		26,5	31,5	13,5
30 мин	20					
30 мин	160					
30 мин	20					

Анализ данных, приведенных в табл. 5, позволяет сделать вывод, что применение грунта ЭП-0234 при получении клеевых соединений с клеем ВК-36 не ухудшает их прочностных характеристик при циклическом воздействии температур от –60 до +150 °С в течение 30 циклов и от –130 до 160 °С в течение 100 циклов.

Заключения

Проведены сравнительные испытания клеевых соединений алюминиевого сплава Д19-АТ Ан.Окс.хром, изготовленных с применением клея ВК-36, с предварительно нанесенным адгезионным грунтом ЭП-0234 и без грунта. Показано, что применение грунта ЭП-0234 позволяет увеличить интервал времени между операциями анодирования поверхности и склеивания с 2 до 30 сут. Одновременно показано, что применение

грунта ЭП-0214 при склеивании клеем ВК-36 не оказывает отрицательного влияния на работоспособность клеевых соединений, а в некоторых случаях, например при воздействии воды и повышенной влажности, позволяет сохранить более высокий уровень прочностных характеристик.

Список источников

1. Козлов В.А., Лякин В.И., Киселев В.Я. Влияние модификации поверхности вулканизированных резин на адгезионную прочность // Клеи. Герметики. Технологии. 2006. № 12. С. 11–15.
2. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренного теплого климата // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4 (25). С. 31–38.
3. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Рубцова Е.В., Исаев А.Ю. Влияние армирования эпоксидного пленочного клея ВК-51 нетканым волокнистым материалом на его свойства // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-47-56.
4. Федосеев М.С., Щербань М.Г., Державинская Л.Ф. Повышение адгезии эпоксидных клеевых композиций к алюминию с помощью промоторов эпокси- и аминоалкоксисиланов // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 5. С. 7–13.
5. Аронович Д.А., Варламов В.П., Войтович В.А. и др. Склеивание в машиностроении: справочник. М.: Наука и технологии, 2005. Т. 1. 544 с.
6. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
7. Старцев О.В., Прокопенко К.О., Литвинов А.А. и др. Исследование термовлажностного старения авиационного стеклопластика // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 8. С. 18–22.
8. Петрова А.П., Кузнецова В.А., Лукина Н.Ф., Исаев А.Ю. Влияние антикоррозионной грунтовки на свойства клеевых соединений, выполненных с применением кремнийорганического клея-герметика // Труды ВИАМ. 2020. № 10 (92). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-13-20.
9. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2019. Т. 10. Ч. 1: Клеи. Клеевые препреги. С. 17–20.
10. 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.
11. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // Эксперт. 2015. № 28 (951). С. 48–51.
12. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
13. Петрова А.П., Аниховская Л.И. Влияние адгезионного грунта ЭП-0234 на свойства клеевых соединений, выполненных фенольно-каучуковым клеем ВК-50 // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 1. С. 19–24.
14. Поциус А.В. Клеи, адгезия, технология склеивания: пер. с англ. СПб.: Профессия, 2007. 376 с.
15. Цверава В.Г., Русин М.Ю., Неповинных В.И., Химицаев А.С. Анализ влияния ускоренного климатического старения на прочность клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 8. С. 28–31.
16. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.

17. Николаев Е.В., Кириллов В.Н., Скирта А.А., Гращенков Д.В. Исследование закономерностей влагопереноса и разработка стандарта по определению коэффициента диффузии и предельного влагосодержания для оценки механических свойств углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3 (28). С. 44–48.
18. 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: 06.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.

References

1. Kozlov V.A., Lyakin V.I., Kiselev V.Ya. Influence of surface modification of vulcanized rubbers on adhesive strength. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2006, no. 12, pp. 11–15.
2. Kirillov V.N., Vapirov Yu.M., Drozd E.A. Research of atmospheric firmness of polymeric composite materials in the conditions of the atmosphere of warm wet and moderately warm climate. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 31–38.
3. Petrova A.P., Lukina N.Ph., Isaev A.Yu. Operability of glued joints on epoxy film adhesives at simultaneous influence of loadings and climatic factors. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-47-56.
4. Fedoseev M.S., Shcherban' M.G., Derzhavinskaya L.F. Increasing the adhesion of epoxy adhesive compositions to aluminum using promoters of epoxy- and aminoalkoxysilanes. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 5, pp. 7–13.
5. Aronovich D.A., Varlamov V.P., Voitovich V.A. et al. Bonding in mechanical engineering: reference book. Moscow: Nauka i tehnologii, 2005, vol. 1, 544 p.
6. Laptev A.B., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
7. Startsev O.V., Prokopenko K.O., Litvinov A.A. et al. Investigation of thermal moisture aging of aviation fiberglass. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2009, no. 8, pp. 18–22.
8. Petrova A.P., Kuznetsova V.A., Lukina N.Ph., Isayev A.Yu. Influence of corrosion inhibiting primer on properties of the glued joints executed using organic silicon glue-hermetic. *Trudy VIAM*, 2020, no. 10 (92), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 03, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-13-20.
9. Aviation materials: reference book in 13 vols. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2019, vol. 10, part 1: Adhesives. Adhesive preregs, pp. 17–20.
10. 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.
11. Kablov E.N. Russia in the market of intellectual resources. *Ekspert*, 2015, no. 28 (951), pp. 48–51.
12. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
13. Petrova A.P., Anikhovskaya L.I. Influence of adhesive primer EP-0234 on the properties of adhesive joints made with phenol-rubber adhesive VK-50. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 19–24.
14. Potsius A.V. Adhesives, adhesion, bonding technology: trans. from Engl. St. Petersburg: Profession, 2007, 376 p.
15. Tsverava V.G., Rusin M.Yu., Nepovinnikh V.I., Himitsaev A.S. Analysis of the influence of accelerated climatic aging on the strength of adhesive joints. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 8, pp. 28–31.

16. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. Trudy VIAM, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 6, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
17. Nikolaev E.V., Kirillov V.N., Skirta A.A., Grashhenkov D.V. Study of moisture transport rules and development of a standard on measurement of the diffusion coefficient and moisture content limit to evaluate mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2013, no. 3, pp. 44–48.
18. 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: February 6, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-4-70-80.

Информация об авторах

Петрова Алефтина Петровна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лукина Наталия Филипповна, главный научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Исаев Алексей Юрьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Смирнов Олег Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleftina P. Petrova, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nataliya F. Lukina, Chief Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey Yu. Isaev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg I. Smirnov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.03.2022.
The article was submitted 28.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 29.03.2022.

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57

СРАВНЕНИЕ ОНЛАЙН- И ОФЛАЙН-ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ И СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

И.Н. Гуляев¹, А.М. Сафронов¹, Р.А. Сатдинов¹

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

Аннотация. Проведено сравнение технологических свойств препрегов, произведенных по онлайн- и офлайн-технологиям, а также физико-механических свойств углепластиков марок ВКУ-29/ВТКУ-3 и ВКУ-39/ВТКУ-2.200 на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212. Оценены преимущества и недостатки рассматриваемых технологий изготовления препрегов и их влияние на свойства углепластиков. Показано, что различие в технологии получения полуфабрикатов (препрегов) не оказывает влияния на конечные свойства углепластиков, изготовленных автоклавным формованием.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, препрег, расплавленное связующее, технология изготовления ПКМ, конструкционные свойства ПКМ

Для цитирования: Гуляев И.Н., Сафронов А.М., Сатдинов Р.А. Сравнение онлайн- и офлайн-технологий изготовления препрегов и свойств углепластиков // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.

Scientific article

COMPARISON ONLINE AND OFFLINE OF PREPREGS MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND PROPERTIES OF CARBON FIBER PLASTICS

I.N. Gulyaev¹, A.M. Safronov¹, R.A. Satdinov¹

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

Abstract. A comparison of the technological properties of prepregs produced by online and offline technologies and the physical and mechanical properties of carbon fiber plastics based on a molten epoxy highly deformative binder is carried out. The advantages and disadvantages of the considered prepreg manufacturing technologies and their influence on the properties of carbon fiber plastics are evaluated. It is shown that the difference in the technology of obtaining semi-finished products (prepregs) does not affect the obtaining of the final properties of carbon fiber plastics obtained by autoclave molding.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber plastics, prepreg, molten epoxy binder, technologies manufacturing PCM, structural properties PCM

For citation: Gulyaev I.N., Safronov A.M., Satdinov R.A. Comparison online and offline of prepregs manufacturing technologies and properties of carbon fiber plastics. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.

Введение

В настоящее время во всех отраслях промышленности, в том числе и в авиационной, наблюдается увеличение спроса на полимерные композиционные материалы

(ПКМ), в которых комплекс высоких прочностных, диэлектрических и теплофизических характеристик хорошо сочетается с экономической эффективностью их использования. Современные ПКМ изготавливают на основе различных наполнителей: стеклопластики – на основе стеклянных, органопластики – на основе арамидных, углепластики – на основе углеродных. Новейшие ПКМ отвечают все возрастающим требованиям к уровню упруго-прочностных характеристик и эксплуатационной стабильности, обеспечивающих работоспособность конструкций, и современным экологическим требованиям к технологиям переработки [1–5].

Ранее для изготовления препрегов использовали растворную технологию, т. е. пропитку осуществляли путем протяжки армирующего наполнителя через раствор связующего в легко удаляемых растворителях типа ацетона или спирто-ацетоновой смеси с последующим их удалением в сушильной камере. При этом в атмосферу выбрасывалось большое количество вредных веществ. Несмотря на сушку при повышенной температуре, в препрегах, изготовленных по растворной технологии, содержится значительное количество летучих веществ, наличие которых при условии их неудаления в процессе формования может привести к существенным отклонениям от регламентируемых физико-механических свойств в ПКМ. Наличие летучих веществ в составе препрега затрудняет определение массовой доли связующего в процессе пропитки, что приводит к существенному его отклонению от заданного содержания. Кроме того, использование растворной технологии изготовления препрегов делает невозможным применение в составе связующих термопластичных добавок и модификаторов, что также негативно сказывается на деформационных свойствах ПКМ и стойкости их к растрескиванию [6–10].

Применение расплавных связующих при изготовлении препрегов позволяет избежать указанных недостатков. Полимерное связующее в расплавленном состоянии путем каландрования совмещается с армирующим наполнителем непосредственно в пропиточной машине. При этом расплав практически не содержит летучих веществ. Содержание связующего можно регулировать зазорами между валками пропиточных машин, на которых изготавливают препреги, что обеспечивает снижение разброса по содержанию связующего в препреге в пределах $\pm 2\%$. Отсутствие растворителя и равномерность нанесения связующего положительно влияют на свойства материалов при изготовлении в дальнейшем изделий из ПКМ. Кроме того, по указанной технологии можно изготавливать препреги на основе однонаправленных жгутов, что невозможно сделать при использовании растворных пропиточных машин [11–15].

Создание ПКМ нового поколения требует решения ряда задач: от разработки термостойких связующих, позволяющих создавать ПКМ с повышенной (до 400 °С) рабочей температурой, и производства современных волокнистых стеклянных и углеродных тканых наполнителей различной текстильной формы, обеспечивающих получение требуемых прочностных характеристик, до разработки технологии их совмещения для получения полуфабриката и/или формирования композиционных материалов [16].

Расширение области применения ПКМ и увеличение объемов их потребления требуют совершенствования технологий изготовления препрегов, в том числе направленного на сокращение времени их производства, при этом обеспечивая получение полуфабрикатов со стабильными свойствами, что в конечном итоге должно привести к снижению стоимости готовых изделий [17].

Производство препрегов по расплавной технологии осуществляется как непрерывно при одновременном изготовлении пленки связующего и совмещении в каландрах (онлайн-технология), так и в отдельных процессах формирования пленки связующего на отдельном узле нанесения пленок (коутере) и последующего совмещения ее в пропиточной машине с армирующим наполнителем (офлайн-технология).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18, 19].

Материалы и методы

В работе исследованы препреги на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и углеродных тканей (однонаправленной ткани марки ВТкУ-3 с поверхностной плотностью 200 г/м^2 , из углеродного жгута 12К, с линейной плотностью 800 текс и равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 с поверхностной плотностью 200 г/м^2 , из углеродного жгута 3К, с линейной плотностью 198 текс, изготовленных по онлайн- и офлайн-технологиям), а также углепластики из этих препрегов марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

При анализе препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на соответствие требованиям технических условий определяли массовую долю связующего (по ASTM D 3529M) и поверхностную плотность (по ASTM D 3776).

При исследовании свойств углепластиков определяли пределы прочности и модули упругости при растяжении и изгибе, а также предел прочности при сжатии.

Изготовление углепластиков, полученных из препрегов по онлайн- и офлайн-технологиям, проводили в автоклаве по стандартному режиму с конечной температурой формования 180°C .

Результаты и обсуждение

Процессы получения препрегов при онлайн- и офлайн-технологиях достаточно схожие, однако имеют ряд отличий и ограничений. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) изготовление препрегов осуществляют по обеим технологиям, также проводится работа по их сравнению. Препреги углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 изготавливали по двум технологиям.

Изготовление препрегов по онлайн-технологии осуществляли на пропиточной установке (рис. 1), разработанной по техническому заданию ВИАМ для получения калиброванных препрегов по расплавной технологии из жгутов 1К-24К (безуточные препреги) шириной 100–600 мм, а также углеродных лент и тканей шириной до 1200 мм.

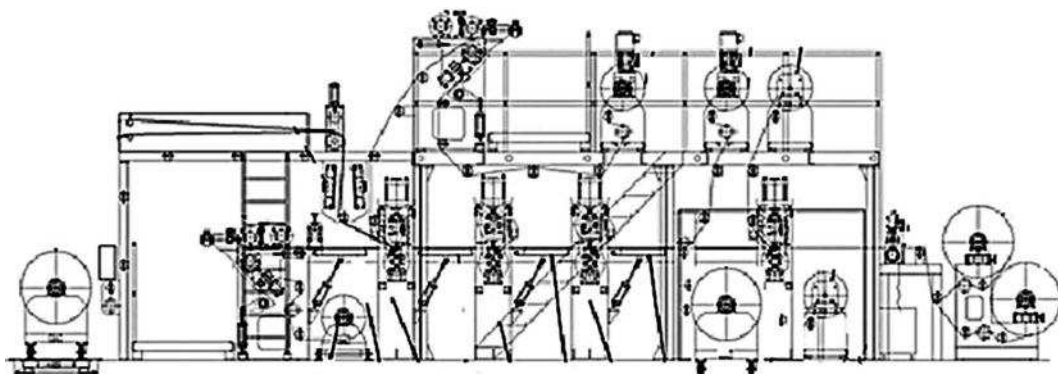


Рис. 1. Схема пропиточной установки для изготовления препрегов по онлайн-технологии

Данный процесс проводят на пропиточных машинах с односторонним, но чаще с двусторонним нанесением связующего на армирующий наполнитель. При этом полимерное связующее переводится в расплав на коутерах и наносится либо на антиадгезионную подложку, с которой в дальнейшем при каландрировании переносится на армирующий наполнитель, либо непосредственно на наполнитель.

Использование онлайн-технологии позволяет работать со связующими на основе низкодеформативных полимеров, например таких, как полиимиды, поскольку совмещение с наполнителем происходит непосредственно с низковязким расплавом. При нанесении же на подложку пленки низкодеформативных связующих остывают, становятся хрупкими и осыпаются с нее – именно по этой причине с такими связующими затруднительно или невозможно работать по офлайн-технологии. Онлайн-технология позволяет непрерывно производить большие партии препрегов, при этом необходимо постоянно поддерживать требуемое количество разогретого связующего на коутерах.

При изготовлении препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 связующее наносилось на антиадгезионную подложку, а затем дублировалось с армирующим наполнителем. В процессе подготовки к пропитке для обеспечения требуемого наноса связующего производится отработка технологических параметров (зазоры в узлах нанесения, соотношение скоростей наносящих валов, позволяющих правильно выбрать способ переноса пленки связующего с наносящего вала на подложку и скорость линии) получения пленки связующего заданных весовых характеристик, что требует дополнительного расхода материалов. Однако в процессе пропитки пленка связующего может менять свои весовые характеристики, а соответственно, будет меняться нанос связующего в препреге. При изготовлении препрега по онлайн-технологии необходим постоянный контроль процесса пропитки с регулярным отбором проб как по ширине, так и по длине полотна. При неудовлетворительных показателях проб корректировка параметров получения пленки и регулирование наноса связующего осуществляются непосредственно в процессе пропитки. Это может приводить к большому разбросу значений по массовой доле связующего и поверхностной плотности как по ширине, так и по длине изготавливаемого препрега. При нанесении связующего на армирующий наполнитель определение наноса связующего осуществляется непосредственно в процессе пропитки, что является причиной еще большего отклонения от средних значений свойств препрега и увеличивает количество технологических вырезов, приводящих к его отходам. При селективном отборе препрегов по массовой доле связующего в соответствии с техническими условиями на материал часть препрегов с большим или меньшим содержанием связующего отбраковывается, что также приводит к увеличению отходов и повышает стоимость их производства.

Избежать этого возможно за счет применения сложных и дорогостоящих автоматизированных систем бесконтактного контроля поверхностной плотности пленки связующего, имеющих обратную связь с системой его нанесения для обеспечения непрерывного контроля содержания связующего в препреге.

Изготовление препрегов по офлайн-технологии осуществляли на установке для производства препрегов на основе расплавных связующих (рис. 2), также разработанной по техническому заданию ВИАМ.

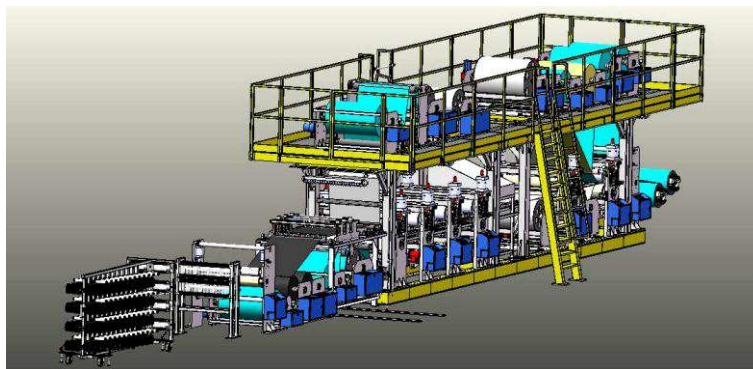


Рис. 2. Схема пропиточной установки для изготовления препрегов по офлайн-технологии

При изготовлении препрега по офлайн-технологии пленка связующего производится в отдельном процессе, при котором исходя из весовых характеристик наполнителя и требуемого содержания связующего определяются ее весовые параметры, позволяющие получать препрег с заданным содержанием связующего. В процессе производства пленки связующего возможно осуществлять контроль за изменением ее весовых параметров и осуществлять их оперативное регулирование, что способствует получению размеростабильной по длине и ширине пленки связующего. В свою очередь это позволяет изготавливать препреги с минимальным разбросом значений по массовой доле связующего. Непосредственный контроль в процессе производства пленки связующего способствует существенному сокращению количества технологических вырезов для анализа препрега в процессе пропитки и приводит к снижению расхода армирующего наполнителя.

Армирующие наполнители имеют различные показатели поверхностной плотности. Например, поверхностная плотность углеродных тканей ВТкУ-3 и ВТкУ-2.200 может составлять 200 ± 10 г/м². Таким образом, один рулон ткани может отличаться от другого по весовым характеристикам. А при изготовлении препрегов по офлайн-технологии возможно изготовление пленок связующего с различной массой, которые при совмещении могут обеспечивать требуемую величину наноса с учетом различных значений массы армирующего наполнителя, что в свою очередь окажет положительное влияние на равномерность получаемого препрега и пластика на его основе.

К недостаткам офлайн-технологии можно отнести то, что не все классы связующих способны перерабатываться с образованием пластичной пленки или сохранять непрерывность слоя после охлаждения (с высокой усадкой).

Исследования проводили для препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и углепластиков на их основе.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты исследования свойств указанных препрегов, изготовленных по двум технологиям.

Таблица 1

Свойства препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200, изготовленных по двум технологиям

Препрег	Значения свойств* препрега					
	с массовой долей связующего, % (по массе)			с поверхностной плотностью, г/м ²		
	по требованиям ТУ	изготовленного по технологии		по требованиям ТУ	изготовленного по технологии	
		онлайн	офлайн		онлайн	офлайн
ВКУ-29/ВТкУ-3	36±4	<u>33–39</u> 36	<u>33–37</u> 35	279–350	<u>297–328</u> 310	<u>294–313</u> 305
ВКУ-39/ВТкУ-2.200	36±4	<u>33–39</u> 36	<u>34–36</u> 35	279–350	<u>299–328</u> 310	<u>300–314</u> 310

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

Анализ свойств препрегов, изготовленных по двум технологиям, свидетельствует о том, что отклонение от среднего значения по массовой доле связующего в препрегах, изготовленных по офлайн-технологии, меньше ($\pm(1-2)$ %), чем у препрегов, полученных по онлайн-технологии (± 3 %), что обеспечивает меньший диапазон значений свойств и более стабильный уровень показателей массовой доли связующего и их поверхностной плотности.

В дальнейшем из препрегов, полученных по онлайн- и офлайн-технологиям, изготовили углепластики, применяя одинаковый стандартный режим формования в автоклаве.

В табл. 2 и 3 приведены сравнительные результаты исследования свойств углепластиков марок ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и ВКУ-29/ВТкУ-3, полученных из препрегов по двум технологиям.

Таблица 2

**Свойства углепластиков марки ВКУ-29/ВТкУ-3,
изготовленных из препрегов по двум технологиям**

Свойства	Значения свойств углепластиков, изготовленных по технологии	
	онлайн	офлайн
Толщина монослоя, мм	0,19	0,19
Массовая доля связующего, % (по массе)	34–37	34–36
Плотность, г/см ³	1,58–1,60	1,58–1,59
Предел прочности при растяжении вдоль волокна, МПа	2300–2500	2300–2450
Модуль упругости при растяжении вдоль волокна, ГПа	130–140	125–130
Предел прочности при сжатии, МПа	1200–1400	1000–1200
Предел прочности при изгибе, МПа	1500–1700	1750–2300
Модуль упругости при изгибе, ГПа	110–125	105–110

Таблица 3

**Свойства углепластиков марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200,
изготовленных из препрегов по двум технологиям**

Свойства	Значения свойств углепластиков, изготовленных по технологии	
	онлайн	офлайн
Толщина монослоя, мм	0,19–0,20	0,20
Массовая доля связующего, % (по массе)	34–37	34–37
Плотность, г/см ³	1,56–1,58	1,58–1,59
Предел прочности при растяжении вдоль волокна, МПа	850–1050	800–950
Модуль упругости при растяжении вдоль волокна, ГПа	60–65	60–65
Предел прочности при сжатии, МПа	760–860	750–850
Предел прочности при изгибе, МПа	1050–1200	1000–1050
Модуль упругости при изгибе, ГПа	58–60	55–57

По полученным результатам видно, что свойства углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200, полученных из препрегов по рассматриваемым технологиям, имеют близкие значения, при этом уровень значений свойств пластиков, получаемых из препрегов по офлайн-технологии, несколько меньше.

Анализ свойств препрегов, изготовленных по различным технологиям, и углепластиков на их основе позволяет сделать вывод о взаимозаменяемости способов изготовления препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

Заключения

Проведено изготовление препрегов углепластиков марок ВКУ-39/ВТКУ-2.200 и ВКУ-29/ВТКУ-3 по онлайн- и офлайн-технологиям. Выполнена оценка технологических характеристик изготовленных препрегов.

Результаты исследования показали, что отклонение от среднего значения по массовой доле связующего в препрегах, полученных по офлайн-технологии, меньше ($\pm(1-2)\%$), чем у препрегов, полученных по онлайн-технологии ($\pm 3\%$), что в дальнейшем при изготовлении углепластиков позволит обеспечить более стабильные значения массовой доли связующего и поверхностной плотности препрега.

Из препрегов, полученных по онлайн- и офлайн-технологиям, изготовлены углепластики по одинаковому стандартному режиму формования в автоклаве и исследованы их основные свойства. Показано, что свойства углепластиков, полученных из препрегов по рассматриваемым технологиям, сопоставимы и различия в технологии изготовления препрегов не влияют на конечные свойства материалов, что позволяет сделать вывод о взаимозаменяемости способов производства препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТКУ-3 и ВКУ-39/ВТКУ-2.200.

Благодарность

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру-технологу И.В. Зелениной за помощь в подготовке статьи.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
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. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Каблов Е.Н. Для освоения космоса нужны новые материалы // Научная Россия. URL: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (дата обращения: 10.12.2021).
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2011. 556 с.
8. Kaushik V., Raghavan J. Experimental study of tool-part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. Vol. 41. No. 9. P. 1210–1218.
9. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 20–26.
10. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.

11. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
12. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Использование принципов «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Композитный мир. 2013. № 5. С. 34–38.
13. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. RU 2012137431А; заявл. 03.09.12; опубл. 10.03.14.
14. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose // Polymer Science. Series D. 2017. Vol. 10. No. 3. P. 225–229.
15. 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.
16. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания термо-реактивного связующего на рабочую температуру до 400 °С // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 58–61.
17. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
18. 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.
19. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

References

1. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. Direktor po marketingu i sbytu, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. Krylya Rodiny, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Kablov E.N. New materials are needed for space exploration. Nauchnaya Rossiya. Available at: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (accessed: December 10, 2021).
6. 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.
7. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. Polymer composite materials: structure, properties, technology: textbook. 3rd ed., rev. and add. St. Petersburg: Profession, 2011, 556 p.
8. Kaushik V., Raghavan J. Experimental study of tool–part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures. Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, vol. 41, no. 9, pp. 1210–1218.
9. Dushin M.I., Hruikov A.V., Muhametov R.R. A choice of technological parameters of autoclave formation of details from polymeric composite materials. Aviacionnye materialy i tehnologii, 2011, no. 3, pp. 20–26.

10. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). Aviation materials and technologies, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
11. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. Polimernye materialy i tekhnologii, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
12. Donetsk K.I., Kogan D.I., Khrulkov A.V. Using the principles of "green chemistry" in promising technologies for the manufacture of products from PCM. Kompozitnyy mir, 2013, no. 5, pp. 34–38.
13. Epoxy binder, prepreg based on it and a product made from it: pat. RU 2012137431A; filed 03.09.12; publ. 10.03.14.
14. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose. Polymer Science. Series D, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 225–229.
15. 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 tekhnologii, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
16. Zheleznyak V.G., Muhametov R.R., Chursova L.V. Study of possibility of thermoset binder creation for operating temperature up to 400 °C. Aviacionnye materialy i tekhnologii, 2013, no. S2, pp. 58–61.
17. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. Aviacionnye materialy i tekhnologii, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». Aviacionnye materialy i tekhnologii, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. Aviacionnye materialy i tekhnologii, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

Информация об авторах

Гуляев Иван Николаевич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сафронов Андрей Михайлович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сатдинов Руслан Амиржанович, заместитель начальника УНТЦ по производству, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan N. Gulyaev, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Ruslan A. Satdinov, Deputy Head of USTC for production, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.04.2022.
The article was submitted 14.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 21.04.2022.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67

МЕТОДЫ ИНФУЗИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор). Часть 1

К.И. Донецкий¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

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

Аннотация. В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяют вместо таких традиционных материалов, как сталь или дерево. Для крупногабаритных деталей из ПКМ процесс инфузии становится наиболее востребованным и часто используемым. По этой технологии изготавливают корпуса кораблей, лопасти ветроэнергетических установок, крылья самолетов. Цель данного обзора – рассмотрение различных видов инфузии, их достоинств, недостатков и перспектив применения.

Ключевые слова: инфузия, смола, полимерный композиционный материал, автоклавное формование, безавтоклавная технология

Для цитирования: Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

Scientific article

INFUSION METHODS FOR THE MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review). Part 1

K.I. Donetskiy¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrulkov¹

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

Abstract. Currently, polymer composite materials (PCM) are widely used instead of such traditional materials as steel or wood. For large-sized PCM parts, the infusion process is becoming the most popular and frequently used. This technology is used to manufacture ship hulls, wind turbine blades, aircraft wings. The purpose of this review is to consider various types of infusion, their advantages, disadvantages and prospects for use.

Keywords: infusion, resin, polymer composite material, autoclave molding, non-autoclave technology

For citation: Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

Введение

Многообразие конструкторских решений и требований по эксплуатации оборудования вызывает у технологов стремление усовершенствовать технологию инфузии и осуществлять разработку различных модификаций и усовершенствованных вариантов данного процесса.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще применяют вместо таких традиционных материалов, как сталь или дерево. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана целая серия материалов для авиационной промышленности (изготавливают детали для планеров самолета и двигателей), исследованы их свойства, проведены испытания в различных климатических зонах [1–6]. Одной из основных тенденций при этом является стремление отказаться от автоклавной технологии, которую сейчас успешно применяют в авиационной промышленности, и перейти к безавтоклавной, открывающей широкие возможности при изготовлении крупногабаритных деталей недорогостоящим способом [7, 8].

В авиационной промышленности процесс инфузии применяют при изготовлении деталей крыла таких самолетов, как Bombardier CSeries (в настоящее время Airbus A220) и MC-21 [9]. В судостроение и производство лопастей ветроэнергетических установок данный процесс также внедрен для изготовления крупных конструктивных композитных деталей [10, 11]. Использование технологии пропитки преформ жидкой смолой, с одной стороны, обеспечивает требуемое качество наполнителя в будущем композиционном материале, а с другой стороны, дает возможность отказаться от дорогостоящего процесса автоклавной технологии. Следует также отметить, что компания «Юматекс» запустила в 2021 г. завод по производству ПАН-прекурсора, что позволяет использовать при производстве композитных конструкций отечественные наполнители, тем самым снижая зависимость от импортных компонентов [12]. Многие исследователи и компании занимаются усовершенствованием технологии инфузии. В научно-технической литературе и патентных источниках рассматривается большое количество инфузионных методов, которые составляют подгруппу группы Liquid Composite Molding [13].

Цель данной статьи – обзор существующих, а также новых разработок в области инфузии, их достоинств, недостатков и перспектив применения.

Технология инфузии. Принцип метода

В работе [14] рассмотрены процессы инфузии и показано историческое развитие данных методов. Термин «инфузия смолы под гибким инструментом» (Resin infusion flexible tooling – RIFT) используется в качестве собирательного термина для таких процессов.

Метод инфузии основан на принципе наличия разницы давления между источником смолы и вакуумным мешком (полостью, где находится формуемая заготовка). Принципиальное различие между инфузией и пропиткой под давлением (трансферное формование – Resin Transfer Moulding (RTM)) заключается в конструкции оснастки. При пропитке под давлением необходимо, чтобы половинки пресс-формы были жесткими и выдерживали давление впрыска, которое больше давления окружающей среды. При инфузии одну из половин формы заменяют гибкой пленкой, при этом давление в полости, где находится формуемая заготовка, меньше давления окружающей среды.

Часто при описании процесса инфузии говорят, что смола засасывается внутрь рабочей полости. Однако с научной точки зрения данное утверждение неверно. Движущей силой, заставляющей смолу двигаться при процессе пропитки методом инфузии, является разница давлений между резервуаром со смолой и полостью, в которой находится формуемая заготовка. Смола не всасывается в полость, а вдавливается в нее независимо от того, идет ли речь о процессе RTM или об инфузии.

Общее описание метода инфузии

При реализации процесса инфузии имеют место следующие операции.

Сначала осуществляется подготовка оснастки с целью обеспечения возможности отделения от нее композитной детали и вспомогательных материалов. Для этого

поверхность оснастки обрабатывают антиадгезионным составом или накрывают разделительной пленкой.

Затем выполняют выкладку заготовки образца или детали. Выкладка может производиться послойно, в том числе с помощью автоматизированной технологии, или пакет заготовки готовится заранее в виде преформы из плетеного наполнителя либо в виде прошивных многослойных тканей.

Далее проводят сборку технологического пакета и его проверку на герметичность. Это обязательная операция, так как в том случае, если пакет будет негерметичным, при пропитке смола потечет по пути наименьшего сопротивления и часть заготовки окажется непропитанной.

Поскольку герметизация осуществляется с помощью вакуумного мешка, а полость вакуумируется, толщина заготовки со смолой изменяется вследствие разницы давлений. Когда смола вдавливаются в полость давлением окружающей среды, давление в полости увеличивается. Это вызывает разнотолщинность, т. е. толщина в зоне впрыска будет больше, чем по мере продвижения фронта потока смолы (рис. 1).

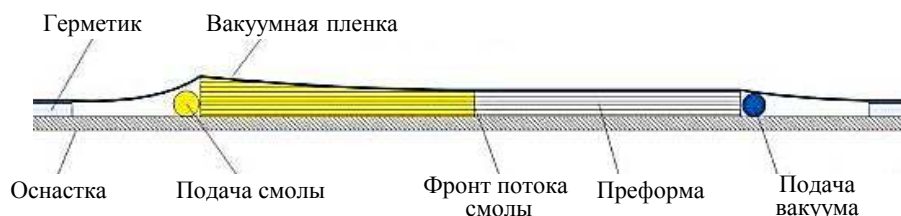


Рис. 1. Изменение толщины заготовки вследствие разницы давления в процессе вакуумной инфузии [15]

В зависимости от габаритных размеров и конфигурации заготовок предусматривается для обеспечения их качественной пропитки различное количество литниковых каналов. Количество каналов выбирают либо на основе опытных работ, либо на основании моделирования процесса. Так, для пропитки заготовок арок моста выбрали схему, учитывающую время, затрачиваемое на пропитку, и, соответственно, состоящую из трех точек впрыска связующего и двух точек вакуумирования [16]. В статье [17] предложено по длине пропитываемой детали располагать спиральную трубку подачи связующего, что обеспечивает качественную пропитку. Такая схема пропитки арочного элемента предполагает, что по всей длине арочного элемента находится спиральная трубка подачи связующего, которая на концах изделия оборачивается по ее окружности. Таким образом, фронт распространения связующего в процессе пропитки распределяется не локально по отдельным областям, а охватывает всю длину арочного элемента.

Обзор инфузионных процессов

В научно-технической литературе и патентных источниках представлено большое количество способов и процессов инфузии. В 1950 г. Ирвинг Маскат (Marco Chemicals Company) запатентовал (заявка подана в 1945 г.) базовый метод пропитки, при котором сухой волокнистый материал помещают между полужесткими формами. Данный метод известен как метод Марко [18]. Используют два варианта пропитки (рис. 2). Во-первых, смола может находиться под давлением. Таким образом, она нагнетается в полость между половинками формы, а воздух вытесняется из полости. Во-вторых, можно использовать источник вакуума, который создает перепад давления между резервуаром для смолы и полостью. Эта разница давлений способствует

выталкиванию смолы в полость, и волокнистый материал пропитывается. В патенте [18] также упоминается, что следует герметизировать открытые концы формы и использовать трубку для соединения с резервуаром для смолы.

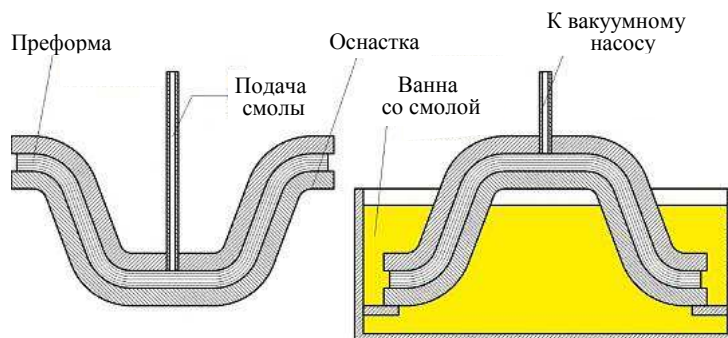


Рис. 2. Схема пропитки по методу Марко [18]

В 1963 г. Филип Грин (English Electric Company) запатентовал метод вакуумной инфузии [19]. Описание соответствует методу вакуумного трансферного формования смолы (Vacuum Assist Resin Transfer Molding – VaRTM), поскольку он представлен во многих публикациях, однако аббревиатура в данном патенте не упоминается. Как видно на рис. 3, сухой волокнистый материал помещают в форму и запечатывают гибкой пленкой вакуумного мешка. Для пропитки пространство между пленкой вакуумного мешка и формой вакуумируется вакуумным насосом. После открытия впускного клапана смола вытекает из резервуара со смолой в полость и пропитывает волокнистый материал. Поток останавливается, когда смола начинает заполнять ловушку для смолы. В качестве опции упоминается, что смола может находиться под давлением для улучшения текучести, но это не обязательно.

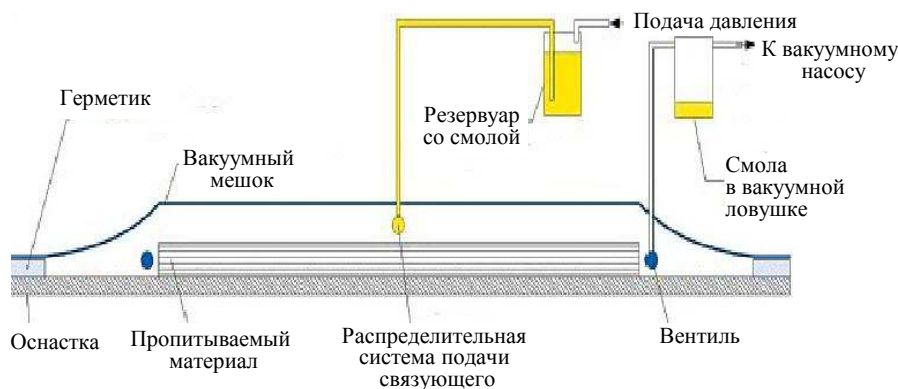


Рис. 3. Схематическое изображение процесса VaRTM [19]

Процесс вакуумного литья смолы (Vacuum assisted resin infusion – VARI) или вакуумной инфузии смолы (Vacuum Resin Injection Moulding – VRIM) [20] запатентован компанией Lotus Car Ltd в 1972 г. Как видно из рис. 4, при пропитке под вакуумным давлением (Light Resin Transfer Molding – LRTM) для пропитки сухого волокнистого материала используют две полужесткие пресс-формы. Перед пропиткой сухой волокнистый материал помещают между формами и в полость заливают отмеренное количество смолы (рис. 4, а). Затем полость вакуумируется, в результате верхняя половина пресс-формы прижимается вниз (рис. 4, б). Это движение заставляет смолу пропитывать сухой волокнистый материал [21]. Особенностью способа, представленного на рис. 4, в, является то, что смола подается под давлением.

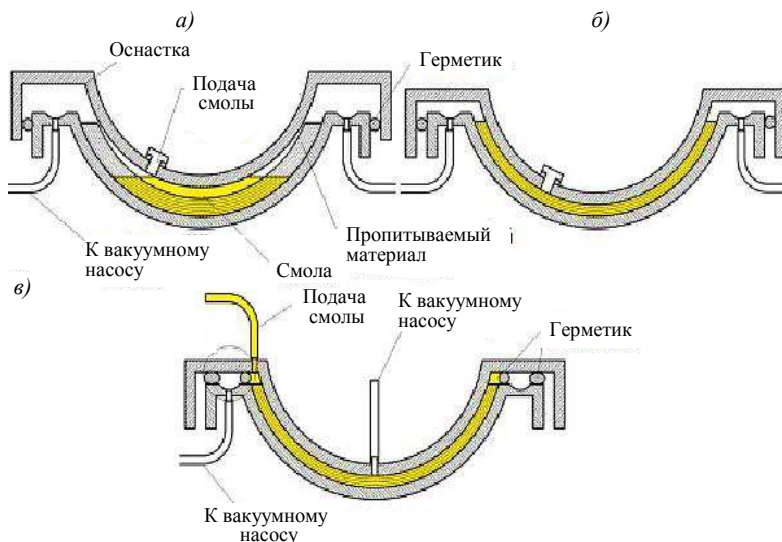


Рис. 4. Схематическое изображение процессов VARI (а, б) и LRTM (в) [21]

Компания Le Comte запатентовала процесс, в котором полосы из пенопласта используют внутри полости для распределения смолы (литье смолы под низким давлением – Light Pressure Transfer Molding (LPRIM)). Полоски имеют канавки, по которым может течь смола. Как только смола достигает концов канала, их можно закрыть нажатием [22]. Для пропитки сухого волокнистого материала с помощью процесса формирования двойной диафрагмы RIFT (DRDF) или процесса вливания смолы между двойными гибкими инструментами используются два вакуумных (из пленки) или два силиконовых мешка. Таким образом, волокнистый материал помещается между двумя мешками, и полость вакуумируется. Во избежание проблем с инфузией, возникающих при складывании волокнистого материала, сборку (установку технологических материалов и вакуумных мешков) мешков и волокнистого материала удерживают при данном процессе в плоском горизонтальном положении. После того как волокнистый материал полностью пропитан, сборка формируется с помощью вакуумной камеры и формы. Для этого она зажимается над вакуумной камерой и за счет вакуумирования последней перепад давления деформирует сборку над формой (рис. 5). Этот этап процесса напоминает процесс глубокой вытяжки или термоформования [23].

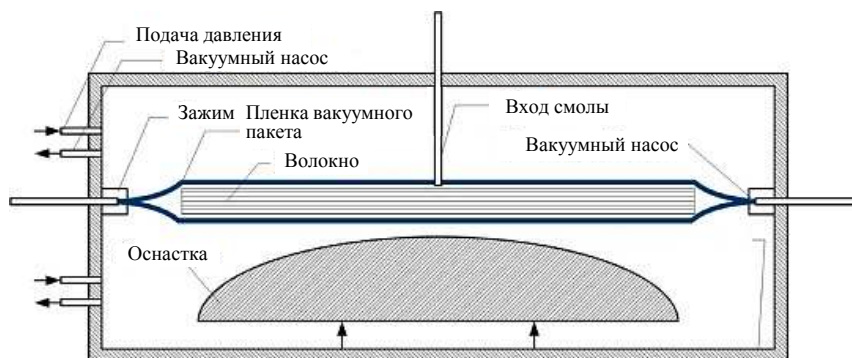


Рис. 5. Схематическое изображение процесса RIFT (DRDF) [24]

Другой процесс пропитки – это метод рециркуляции с впрыском смолы (Resin Injection Recirculation Method – RIRM). Смола для пропитки хранится в резервуаре, который также служит ловушкой для нее. Полость вакуумируется (0,017–0,05 МПа), и

смола закачивается в полость (0,02–0,14 МПа). Смола вдавливается в полость до тех пор, пока она снова не появится в ловушке для смолы, и смола перекачивается из ловушки для смолы обратно в полость. Этот цикл продолжается до полной пропитки сухого волокнистого материала [19]. Процесс однолинейной инфузии (Single line injection – SLI) запатентован Немецким аэрокосмическим центром в 2000 г. В данном процессе для вакуумирования и инфузии используется одна линия. Это стало возможно благодаря использованию тройника в смоле и линии откачки. На рис. 6 показаны отдельные этапы процесса. Сначала отсоединяется линия к резервуару для смолы (рис. 6, а), что позволяет отвакуумировать рабочую полость. На следующем этапе линия к полости и к вакуумному насосу закрывается (рис. 6, б). При открытии линии к резервуару для смолы смола поступает к зажимам. Пузырьки воздуха можно удалить, отсоединив линию от вакуумного насоса во второй раз. Наконец, линия к детали снова открывается и смола стекает в полость (рис. 6, в). Согласно патенту [25], отсутствует дополнительная линия вакуумирования. Поэтому в полости должна быть предусмотрена возможность промывки или замены на чистые линии вакуумирования и подачи смолы.

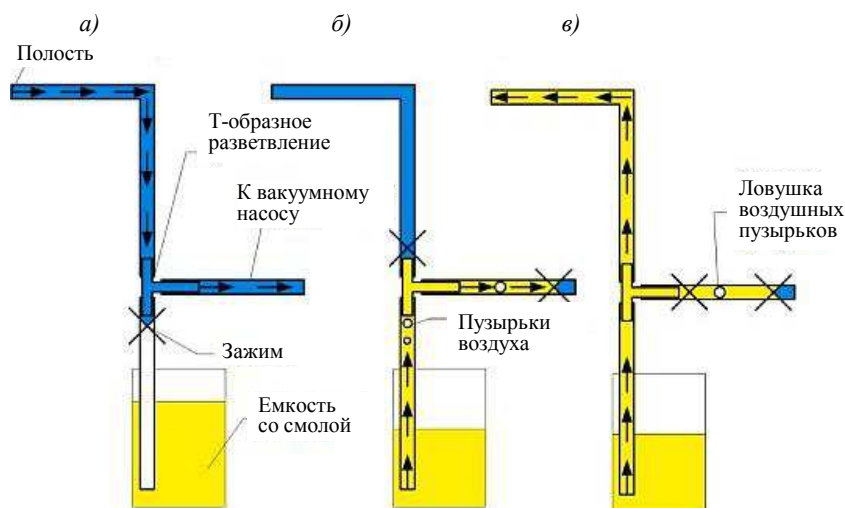


Рис. 6. Схематичное изображение процесса SLI [25]

Этапы процесса и отдельные условия давления для процесса вакуумной инфузии с перепадом давления (Vacuum Assistant Double Pressure Infusion – VADPI) показаны на рис. 7. В этом процессе используются каналы распределения смолы вне полости. Перепад давления между полостью и каналом деформирует вакуумный мешок и создает проточный канал для распределения смолы в полости. Поскольку давление в зоне канала меньше давления окружающей среды, проницаемость волокнистого материала увеличивается. Конструкция канала может быть спроектирована таким образом, что создается дополнительный канал из чистой смолы. Расположение нескольких каналов зависит от их геометрической формы и может быть, например, в форме ромба. Большая поверхность заготовки детали делится на небольшие участки, которые легко пропитать. В конце процесса инфузии к каналу прикладывается давление окружающей среды, и излишки смолы удаляются из области канала. Таким образом, на поверхности детали следов канала не остается [26].

Поскольку качество и экономичность производства компонентов из волокнистых композиционных материалов имеет важное значение при их успешном выводе на рынок, в Институте строительной механики разработан процесс SLI с целью получения высококачественных деталей из ПКМ. Такой процесс может быть оптимизирован для

производства небольших серий и прототипных конструкций в количестве до 500 шт. в год. По данной технологии можно изготавливать детали для самолетов, железных дорог и прототипов транспортных средств, а также использовать ее в строительстве. Подход к разработке метода SLI, по существу, заключается в объединении технологии инфузии жидкой смолы с автоклавным формованием композита. На рис. 8 изображена схема процесса SLI.

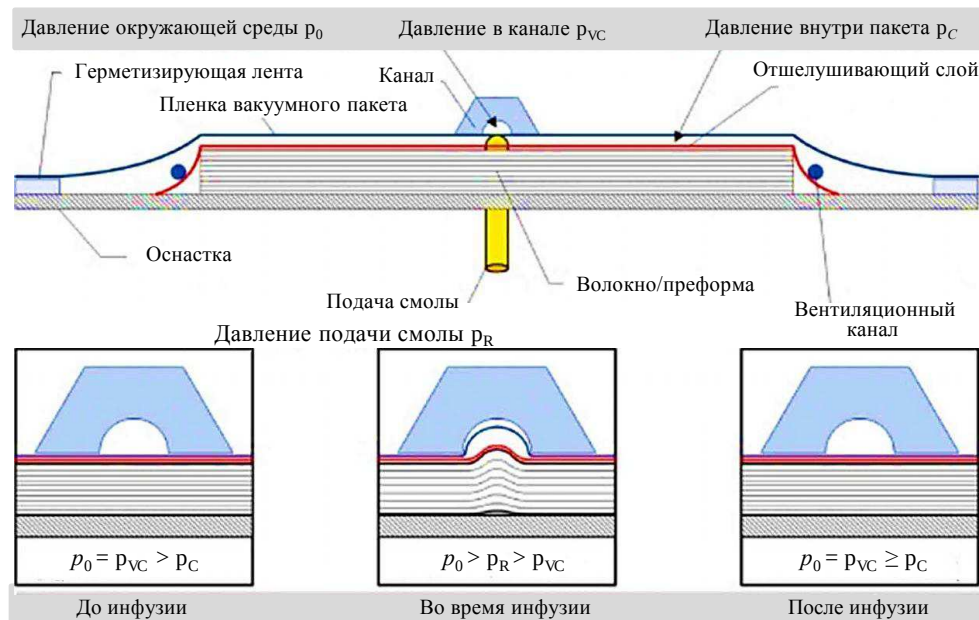


Рис. 7. Схематичное изображение процесса VADPI [26]

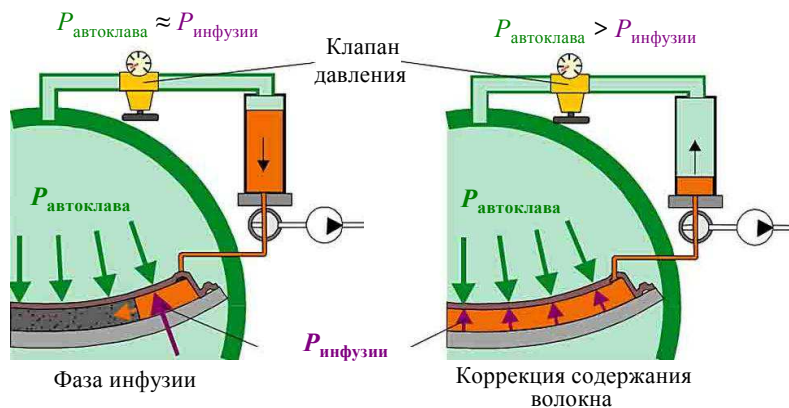


Рис. 8. Схематичное изображение процесса SLI [14]

Преимущество данного метода, по сравнению с методом VARI, заключается в том, что смола впрыскивается под давлением и ламинат можно уплотнить под давлением автоклава. Название метода указывает на то, что эвакуация волокнистой заготовки, а также закачка связующего осуществляются по той же линии. Эта комбинация впрыск/линия откачки может быть расположена на волокнистой заготовке в любом месте так, чтобы сократить путь и, соответственно, время впрыска. С помощью метода SLI можно комбинировать нетканый и сухой тканый материал, например такой, как ткани простого переплетения и трикотажные полотна с оптимальной матричной структурой для каждого типа деталей. В дополнение к стандартным эпоксидным смолам, винилэфирной смоле, полиизоциануратам, термостойким смолам, таким как бисмалеимид, также можно использовать и фенольные смолы. Данная технология

обеспечивает высокое качество ПКМ без пор и расслоений благодаря применению автоклавного процесса формования на финальном этапе изготовления изделия. Дополнительным «бонусом» метода SLI является возможность прямого воздействия на содержание волокна в пластике с помощью изменения параметров процесса, обеспечивающих равновесие внутреннего давления смолы, «сопротивления» волокнистого материала и давления автоклава. Если давление в автоклаве отрегулировано так, что оно соответствует внутреннему давлению смолы, то происходит пропитка наполнителя непосредственно за счет вакуумной инфузии. В том случае, когда наполнитель полностью пропитан, автоклав, обеспечивающий избыточное давление на вакуумный пакет, может «задавить» давление впрыска и тем самым обеспечить желаемое содержание волокна в ПКМ (обычно 60 % (по массе)).

Процессы инфузии RIFT типа I могут быть применены в сочетании с другими методами. При этом их не всегда легко отличить, так как, например, процедура инфузионной пропитки под давлением (Resin Infusion Transfer Moulding – RITM) может сочетаться с другими процедурами инфузии. Процесс SLI также сочетается с процессом двойного давления при пропитке под давлением (Double pressure transfer moulding – DP-RTM) для производства обтекателей Do328 [25].

Заключения

Представлены методы инфузии, рассмотренные в научно-технической литературе и патентных источниках.

Процессы инфузии имеют различные модификации и могут использоваться в сочетаниях с другими методами.

Процесс инфузии связующего в сухой наполнитель несомненно является перспективным как с точки зрения возможности изготовления крупногабаритных деталей, так и с точки зрения экономической эффективности.

Список источников

- 1 Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
- 2 Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
- 3 Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
- 4 Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
- 5 Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
- 6 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.
- 7 Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
- 8 Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

- 9 Авиация России: МС-21 – лайнер с «черным» крылом. URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (дата обращения: 16.02.2022).
- 10 Францев М.Э. Проектный анализ водоизмещения однокорпусных противоминных кораблей из композиционных материалов // Композитный мир. 2020. № 4. С. 58–69.
- 11 Соловьева А.А., Кулак К.С., Артамонова Е.Ю. Использование композиционных материалов при проектировании ветроэнергетических установок // Молодой ученый. 2016. № 22 (126). С. 50–54.
- 12 Юматекс Росатом запустил в промышленное производство ПАН-завод. URL: <https://umatex.com/news/yumateks-rosatom-zapustil-v-promyshlennoe-proizvodstvo-pan-zavod/> (дата обращения: 16.02.2022).
- 13 Advani S.G., Sozer E.M. Process modeling in composites manufacturing. New York: CRC Press, 2010. 630 p.
- 14 Williams C., Summerscales J., Grove S. Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): a review // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 1996. Vol. 27 (7). P. 517–524.
- 15 Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 126. P. 55–83.
- 16 Гончаров В.А., Раскутин А.Е. Компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении композитного арочного элемента // Труды ВИАМ. 2015. № 7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
- 17 Вешкин Е.А., Постнов В.И., Постнова М.В., Баранников А.А. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4-3. С. 344–350.
- 18 Method of molding: pat. US2495640A. No. 598339; filed 31.05.46; publ. 24.01.50.
- 19 Improvements in or relating to methods of producing Reinforced Plastic Structures: pat. GB944955A. No. 13029/60; filed 12.04.60; publ. 18.12.63.
- 20 Method and apparatus for producing a thin-walled article of synthetic resin, in particular a large-sized article: pat. US4359437A. No. 242295; filed 11.03.80; publ. 16.11.82.
- 21 Moulding cooling fan operating circuits for road vehicles: pat. GB1432333A. No. 14946/72; filed 30.03.72; publ. 14.04.76.
- 22 Method for manufacturing an object of synthetic resin: pat. US5096651A. No. 527450; filed 23.05.90; publ. 17.03.92.
- 23 Lazarus P. Resin infusion of marine composites // International SAMPE symposium. 1996. No. 41. P. 1447–1458.
- 24 Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM – Verfahren, Germany: pat. DE19853709C1; filed 20.11.98; publ. 10.02.00.
- 25 Vakuuminfusionsverfahren und Vorrichtung dafür, German, French: pat. EP2700493B1; filed 24.08.12; publ. 16.09.15.
- 26 Herrmann A., Pabsch A., Kleineberg M. SLI-RTM fairings for Fairchild Dornier DO 328 Jet // SAMPE Europe conference. 2001. P. 1–12.

References

1. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. Vestnik RFFI, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. Krylya Rodiny, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
4. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). Aviation materials and technologies, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
5. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). Aviation materials and technologies, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 16, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
6. 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.
7. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N., Composite materials for non-autoclave technology (review). Trudy VIAM, 2018, no. 3 (63), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.

8. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: February 17, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
9. Aviation of Russia: MS-21 – an airliner with a "black" wing. Available at: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (accessed: February 16, 2022).
10. Frantsev M.E. Design analysis of the displacement of single-hull anti-mine ships made of composite materials. *Kompozitnyy mir*, 2020, no. 4, pp. 58–69.
11. Solovieva A.A., Kulak K.S., Artamonova E.Yu. The use of composite materials in the design of wind power installations. *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 22 (126), pp. 50–54.
12. Umatex Rosatom launched a PAN plant into industrial production. Available at: <https://umatex.com/news/yumateks-rosatom-zapustil-v-promyshlennoe-proizvodstvo-pan-zavod/> (accessed: February 16, 2022).
13. Advani S.G., Sozer E.M. *Process modeling in composites manufacturing*. New York: CRC Press, 2010, 630 p.
14. Williams C., Summerscales J., Grove S. Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): a review. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, vol. 27 (7), pp. 517–524.
15. Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, pp. 55–83.
16. Goncharov V.A., Raskutin A.E. Computer modeling of the infusion process in the manufacture of composite arched element. *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
17. Veshkin E.A., Postnov V.I., Postnova M.V., Barannikov A.A. Experience in the use of vacuum infusion technologies in the production of PCM structures. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4-3, pp. 344–350.
18. Method of molding: pat. US2495640A. No. 598339; filed 31.05.46; publ. 24.01.50.
19. Improvements in or relating to methods of producing Reinforced Plastic Structures: pat. GB944955A. No. 13029/60; filed 12.04.60; publ. 18.12.63.
20. Method and apparatus for producing a thin-walled article of synthetic resin, in particular a large-sized article: pat. US4359437A. No. 242295; filed 11.03.80; publ. 16.11.82.
21. Moulding cooling fan operating circuits for road vehicles: pat. GB1432333A. No. 14946/72; filed 30.03.72; publ. 14.04.76.
22. Method for manufacturing an object of synthetic resin: pat. US5096651A. No. 527450; filed 23.05.90; publ. 17.03.92.
23. Lazarus P. Resin infusion of marine composites. *International SAMPE symposium*, 1996, no. 41, pp. 1447–1458.
24. Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM – Verfahren: pat. DE19853709C1; filed 20.11.98; publ. 10.02.00.
25. *Vakuum infusions verfahren und Vorrichtung dafür*: pat. EP2700493B1; filed 24.08.12; publ. 16.09.15.
26. Herrmann A., Pabsch A., Kleineberg M. SLI-RTM fairings for Fairchild Dornier DO 328 Jet. *SAMPE Europe conference*, 2001, pp. 1–12.

Информация об авторах

Донецкий Кирилл Игоревич, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Усачева Мария Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Kirill I. Donetskiy, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria N. Usacheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Khrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.03.2022.
The article was submitted 09.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 17.03.2022.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-68-79

БИОДЕГРАДАЦИЯ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

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

Аннотация. Рассматривается биологическое повреждение термопластичных и термореактивных армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ), углеродных и стеклянных волокон и смол микроорганизмами и грибами. Показано, что биodeградация влияет на структурную целостность материала, его физические и механические свойства. Рассмотрены условия благоприятного развития микроорганизмов, механизм биodeградации, некоторые виды бактерий и грибов, поражающие ПКМ, и механизмы образования биопленок.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, биodeградация, микроорганизмы, грибы, биоповреждения, углеродные волокна, стеклянные волокна

Для цитирования: Усачева М.Н., Хрульков А.В. Биodeградация армированных полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-68-79.

Scientific article

BIODEGRADATION OF REINFORCED POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)

M.N. Usacheva¹, A.V. Khrul'kov¹

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

Abstract. This review considers the biological damage of thermoplastic and thermoset reinforced polymer composite materials, carbon and glass fibers and resins by microorganisms and fungi. It is shown that biodegradation affects the structural integrity of the material, physical and mechanical properties. The conditions for the favorable development of microorganisms, the mechanism of biodegradation, some types of bacteria and fungi that affect polymer composite materials and the mechanisms of biofilm formation are considered.

Keywords: polymer composite materials, biodegradation, microorganisms, fungi, bio-damage, carbon fibers, glass fibers

For citation: Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. Biodegradation of reinforced polymer composite materials (review). Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-68-79.

Введение

Армированные волокном полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в транспортной, медицинской, авиационной и космической промышленности [1–7]. Композиционные материалы имеют двухфазную структуру:

армирующее волокно и основу – матрицу из смолы. Большое количество волокон содержится в единице объема армированного ПКМ в качестве средства увеличения прочности материала, так как именно волокно определяет данный показатель.

Структурная целостность композиционного материала является ключом к его долговечности и отличным характеристикам. Ряд факторов может влиять на целостность ПКМ, включая адгезию между волокном и матрицей, распределение и ориентацию волокон и реакцию каждого его компонента на условия окружающей среды, в том числе на влажность и температуру. Несовершенство одного компонента композита или локальное разделение компонентов могут вызывать прогрессирующее расслоение, отслоение или отделение волокон от матриц, что приводит к снижению прочности и жесткости. К таким факторам относят структурные дефекты: ослабление межфазных связей между волокнами и матрицей, расслоение и разделение компонентов [8].

Предполагается, что биологическое повреждение композиционных материалов может существенно повлиять на их структурную целостность, физические и механические характеристики. Поскольку в составе ПКМ есть несколько химически и физически различных компонентов, локальные химические изменения, возникающие в результате роста и метаболизма микроорганизмов, ускоряют повреждение составных компонентов. На поверхности или в пустотах в ПКМ могут концентрироваться питательные вещества, создавая благоприятную среду для развития микроорганизмов. Волокна могут служить капиллярами для улучшения движения и распределения влаги и химических веществ внутри ПКМ, а также увеличивают распространение микроорганизмов внутри структуры [9].

К сожалению, изучению биологической деградации армированных ПКМ уделяется мало внимания. Ранее считали, что ПКМ, как и пластмассы, устойчивы к разрушению микроорганизмами, поскольку материалы не могли их обеспечить необходимыми питательными веществами [10]. Однако материалы, которые являются биологически инертными или для которых требуется длительный период разрушения, могут быть восприимчивы к механизмам разрушения, вызванным биологической активностью микроорганизмов. Например, длительное время полагали, что корпуса лодок, выполненные из стеклопластика, не подвержены коррозии, биообрастанию или деградации, характерным для обычных материалов. Однако в настоящее время признано, что на всех инженерных материалах колонизируются микроорганизмы, включая бактерии, в течение нескольких часов после нахождения в природных водах [11]. Биодеградации подвержены материалы, из которых изготовлены корабли, самолеты, канализационные трубы, медицинские изделия и космические станции.

Очень мало известно о биодеградации синтетических полимерных материалов, поскольку они не так давно стали широко распространены и к тому же достаточно медленно деградируют в природных условиях. Различия в углеродных цепях, конформациях и стереохимии у материалов указывают и на большие их различия в биодеградации. Высокая молекулярная масса приводит к снижению растворимости, что является неблагоприятным фактором для атаки микроорганизмов, так как для бактерии необходимо, чтобы субстрат (материала) ассимилировался через клеточную мембрану и затем разложился под действием клеточных ферментов. Во время разложения ферменты микроорганизмов разрушают длинные полимерные цепочки, образуя более короткие – олигомеры, димеры и мономеры, которые достаточно небольшие, чтобы пройти через мембрану бактерии и использоваться в качестве источника углерода и энергии [12].

Флемминг обнаружил, что материалы не обязательно должны легко распределять и накапливать влагу и быть полностью заселены микроорганизмами, чтобы деструктурировать под их воздействием и удовлетворять потребность в питательных веществах [13].

В ходе жизнедеятельности микроорганизмы выделяют ряд экзоферментов, которые взаимодействуют с материалом, тем самым разрушая его [14]. Деградация ПКМ под воздействием внешних и биологических факторов делает более доступными те фракции материала, которые изначально не были «легкодоступными» для микроорганизмов. На этой стадии развивается биопленка, ускоряющая процесс биодеградации [15].

Биологическое повреждение композиционного материала может значительно повлиять на его физическую целостность и усталостные характеристики. Поскольку существует несколько химически и физически разных компонентов в его составе, локализованные химические изменения, возникающие в результате роста и метаболизма микроорганизмов, способствуют ускорению повреждения отдельных компонентов. В определенных местах или пустотах в армированных ПКМ могут концентрироваться питательные вещества, обеспечивая создание благоприятной среды для развития микробов. Микробная активность и продукты их жизнедеятельности, в свою очередь, увеличивают повреждение материалов. Волокна проводят влагу и химические вещества внутри ПКМ и способствуют распространению бактерий и грибов внутри структуры. Незначительные химические изменения в локализованных областях могут резко снизить эксплуатационные характеристики материала и ослабить физические свойства композита [16].

Способность полимеров подвергаться биоразрушению существенно зависит от условий эксплуатации ПКМ. Возникновение и развитие микроорганизмов и грибов определяется множеством факторов внешней среды: температурой, кислотностью, влажностью, наличием света, степенью аэробного состояния и давлением. Микроорганизмы и грибы более интенсивно разрушают материалы и изделия в регионах с относительно высокой температурой воздуха, повышенной влажностью и большим количеством органической пыли (тропики и субтропики) [17].

На ПКМ неблагоприятно воздействуют анаэробные, аэробные бактерии и грибы. После аэробного воздействия полимер разлагается на CO_2 , H_2O и микробные биомассы; после анаэробного – на органические кислоты, CO_2 , CH_4 и микробные биомассы [12]. Микроорганизмы растут и образуют биопленку. Окружающая среда на границе раздела «биопленка–материал» радикально отличается от основной среды с точки зрения pH, содержания кислорода, а также органических и неорганических веществ [18]. Более того, ПКМ подвержены разложению из-за проникновения влаги и осмотического образования пузырей, несмотря на то, что данные факторы изучены и могут быть устранены с помощью надлежащих процедур производства и обслуживания [19].

Изучение влияния микроорганизмов на целостность композиционных материалов имеет важное значение для всесторонней оценки биологического повреждения и для будущей разработки устойчивых материалов.

Поражение армированных ПКМ микроорганизмами и грибами

Полимерные композиционные материалы подвержены многим видам экологической деградации. Все фазы (волокна, смолы и поверхность раздела «волокно–смола») армированных ПКМ подвержены определенному типу микробной деградации. Волокна, обычно стеклянные или углеродные, обеспечивают прочность армирования; матрицы из смолы – передачу нагрузки и рассеивание энергии. Связь между волокном и смолой необходима для целостности композита. Волокна обычно не разлагаются при наличии микроорганизмов, хотя в работе [20] сообщается, что графитовые волокна были атакованы грамотрицательными бактериями, выделенными из почвы. В работе [21] указано на разрушение стеклянных и углеродных волокон, которое вызвано грибами, с проникновением в смолу. Волокна также поражаются микроорганизмами, образующими биопленку [16].

Природные популяции микроорганизмов способны расти на поверхностях армированных ПКМ как при относительно высокой (65–70 %), так и при более низкой влажности (55–65 %) [22]. Накопление грибов на поверхности композиционных материалов приводит к образованию толстого слоя биопленки и снижает их устойчивость к дальнейшим изменениям окружающей среды: обнаружено, что сопротивление ПКМ значительно уменьшилось после первых 3 мес. Явные различия в развитии биопленок обнаружены и на ПКМ, используемых для аэрокосмического применения [23]. Дальнейшие исследования показали, что многие грибы способны использовать химические вещества, например пластификаторы и вещества для обработки поверхности, в качестве источника углерода и энергии (рис. 1), а компоненты смолы способствуют росту и размножению микроорганизмов (рис. 2) [16].

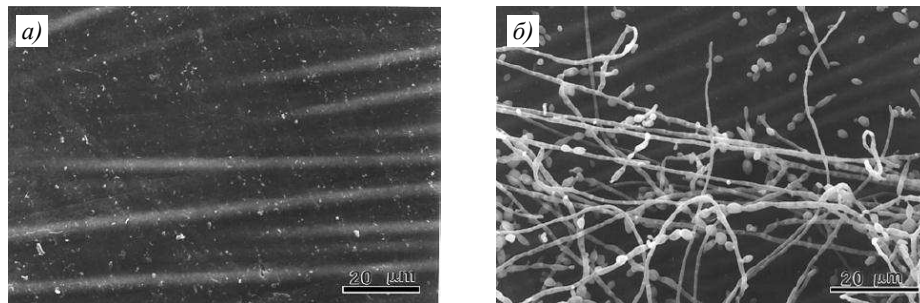


Рис. 1. Микрофотографии поверхности углепластика на основе эпоксидного связующего без признаков заражения (а) и с колонией грибов спустя 30 дней после заражения (б) [23]

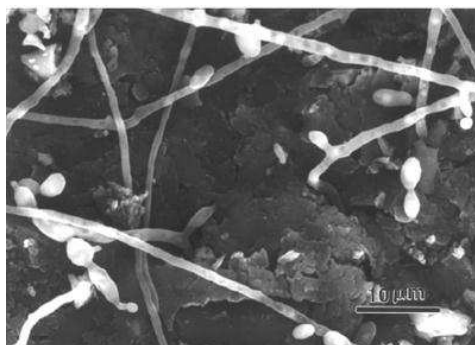


Рис. 2. Микрофотография пораженной грибами эпоксидной матрицы в углепластике [23]

Органические добавки к волокнам, такие как пластификаторы и стабилизаторы, могут содержать питательные вещества для роста микробов и окончательного разложения волокон [24]. Полиэфирные и полиэфирно-полиуретановые смолы также уязвимы перед микробным воздействием. Впервые данный факт обнаружен в текстильной промышленности по производству винила. Эпоксидные смолы считаются более устойчивыми к бактериальному воздействию [19], однако деградируют быстрее, чем волокна. И в смолах, и в волокнах достаточно углерода для роста микроорганизмов [22].

К возможным механизмам микробной деградации ПКМ можно отнести: прямое воздействие на смолу кислот или ферментов, образование пузырей в результате выделения газа, усиленное растрескивание из-за известковых отложений и выделения газа, а также дестабилизацию полимера концентрированными хлоридами и сульфидами. Любая атака микроорганизмов может привести к потере прочности материала вследствие его разрушения, отслоения или расслоения и окончательного разрушения [19]. Чем больше водопоглощение ПКМ, тем проще продуктам жизнедеятельности микроорганизмов (неорганические вещества, кислоты, ферменты) проникнуть внутрь материала, что приводит к гидролизу его компонентов.

В работе [19] показано, как в течение 161 дня подвергали воздействию микробных культур три образца из ПКМ: углепластик и стеклопластик на основе эпоксидной смолы, а также углепластик на основе виниловой смолы. По истечении данного срока обнаружены колонии микроорганизмов, остатки их жизнедеятельности и локальная деградация материала. После этого провели испытания на трех- и четырехточечный изгиб. Для деформации деградированных образцов потребовалось меньше напряжения, чем для деформации биодegradированных образцов.

В работе [25] показано, что углепластики, гальванически связанные с металлами, разлагаются катодными реакциями в морской воде. Эпоксидные и нейлоновые покрытия на стали разрушаются смешанными культурами морских бактерий.

В статье [16] представлено исследование углепластиков на основе эпоксидной матрицы (однонаправленного в направлении $[0^\circ]$ и в направлении $[0^\circ; +45^\circ; 90^\circ; -45^\circ]_{2S}$), полиэфирафетона, бисмалеида и стеклопластика на основе фторированного полиимида на устойчивость к грибам в течение 1 мес. Грибы использовали ПКМ как источник углерода и энергии, поэтому успешно размножались на всех пяти материалах. Данное исследование также показало, что грибы обладают способностью широко заселять поверхности волокон. Например, через 84 дня после заражения грибами углеродных волокон они были полностью покрыты гифами грибов. Контрольные углеродные волокна из стерильной колбы были покрыты химическими соединениями в небольшом количестве – по-видимому, грибы использовали эти соединения в качестве источника углерода и энергии.

В работе [26] рассмотрена биодеструкция шести образцов из ПКМ: двух стеклопластиков на основе фенолформальдегидного связующего, органопластика на основе эпоксидного связующего и трех углепластиков на основе фенолформальдегидного связующего, где наполнителями являются углеродные волокна, ткань или трикотаж. Образцы заражали плесневыми грибами, выделенными из почвы. В результате микробицеты грибов использовали все образцы в качестве источника питания, однако развитие происходило с разной скоростью. Наиболее пораженными оказались образцы на основе углеродных ткани и трикотажа, наименее – стеклопластик на основе фенолформальдегидного связующего.

В работе [27] показано исследование двух стеклопластиков на основе фенолформальдегидного связующего, органопластика на основе эпоксидного связующего и углепластика на основе фенолформальдегидного связующего, где наполнителями являются углеродные трикотаж, ткань или волокно. Больше всех зараженным грибами оказался органопластик – грибы покрыли $>25\%$ поверхности материала. Остальные образцы также поражены грибами, однако площадь их заселения несколько меньше. После 90 сут экспозиции наблюдались небольшие изменения в структуре образцов, после 120 сут отчетливо видно нарушение структуры ПКМ.

Исследовали также биодegradацию термопластичного углепластика [28]. Образцы помещали в специальную среду, содержащую микроорганизмы, выделенные из почвы, на 20 недель, после чего проверяли свойства ПКМ. Механические и термические характеристики уменьшились после воздействия микробов. Обнаружено, что разложение композиционного материала инициировалось гидролизом сложного эфира, присутствующего в матрице, о чем свидетельствует снижение температуры начала разложения ПКМ. Биодegradация усиливалась за счет роста микробов, которые использовали углерод для питания.

Бактерии, продуцирующие водород, разрушали связь между волокнами и винилэфирной смолой, проникая в нее на границе раздела фаз между смолой и волокнами. Дegradация возникала в дополнение к разрушению волокон и смолы в результате

образования газа внутри материала [29–31]. На ПКМ также может влиять выщелачивание гетеротрофными бактериями, которые извлекают углерод из полимера для питания и производят активные формы кислорода во время роста [32].

В работе [33] проведено исследование углепластика на основе эпоксидного связующего, а также стекло- и углепластика на основе полиэфирного связующего. Образцы подвергали микробному воздействию в течение 161 сут. Углеродные и стеклянные волокна, полиэфирную и эпоксидную смолы исследовали отдельно в течение 90 дней, подвергая воздействию сульфатредуцирующих и водородных бактерий. Эпоксидная смола и углеродные волокна, в композите или отдельно, от воздействия серо- и железобактерий, сульфатредуцирующих и водородных бактерий не деградировали. Бактерии колонизировали поверхность смол, волокон и ПКМ, но не вызвали их повреждения.

Аналогично изучили воздействие смешанной культуры сульфатредуцирующих бактерий на углепластик в течение 1 мес. Бактерии выделили из пораженного вала из углепластика, находящегося на корабле. После экспозиции в среде оценили поверхность образцов. Черная сульфидная пленка покрывала поверхность ПКМ, однако видимых следов образования коррозии или пузырей не обнаружено. После 7 мес колонии бактерий появились на гладкой поверхности сульфидного слоя. Бактерии сконцентрированы преимущественно вдоль границ раздела «волокно–смола» и в царапинах на поверхности образцов. Значения механической прочности пораженных образцов стали заметно меньше. Это указывает на то, что сульфатредуцирующие бактерии могут вызывать снижение механических свойств эпоксидных углепластиков [31].

Вопрос об ухудшении механических свойств композиционных материалов после биodeградации является очень важным. Физико-механические испытания не всегда могут быть чувствительны к изменениям в материале после воздействия микроорганизмов [23]. Грибы более агрессивно атакуют армированные ПКМ в течение более длительного периода, в отличие от бактерий, которые действуют в течение короткого времени [34].

В работе [14] показаны попытки определить механические изменения в образцах из ПКМ после воздействия грибковой культуры. Однако значительных механических изменений после 120 дней воздействия обнаружено не было. Сделано предположение, что необходимо использовать методологии, достаточно чувствительные для обнаружения поверхностных изменений. Акустические методы также предложены как средство обнаружения изменений физических свойств материалов [31].

Грибы могут проникать внутрь ПКМ, состоящих из фторированных полиимидных смол, армированных стекловолокном [16]. В работе [35] также показано заражение полиимидов грибами, которые встречаются в воздухе и на поверхности материалов. Существует мнение, что бактерии менее активны в отношении полиимидных смол, чем грибы [36]. Волокна в композиционном материале могут способствовать колонизации грибов, выступая в качестве капилляров для транспортировки питательных веществ, которые стимулируют обширную микробиологическую инвазию и колонизацию. Однако наличие грибов показывает снижение качества ПКМ только спустя 350 дней [21]. В работе [9] представлено исследование углеродных волокон и тканей после воздействия консорциума грибов, результаты которого показали, что грибы активно колонизировали поверхность.

В работе [23] изучено влияние грибов на стеклоуглепластик на основе эпоксидного связующего. Гибридные ПКМ тоже поражаются грибами. В работе [37] также рассмотрен гибридный стеклоуглепластик. Колонии грибов селились на поверхности ПКМ и локально проникали внутрь.

Известны исследования биodeградации арамидных волокон жуками *Anthrenus flavipes* и их личинками [38], которые поражают материалы, выполненные из кожи животных, шерсти и других натуральных тканей, а также из мягкой древесины. Через 20 дней после воздействия личинок *Anthrenus flavipes* биodeградацию невооруженным взглядом заметить было невозможно, однако результаты исследования с помощью микроскопа показали сильную структурную деформацию волокон.

В работе [39] представлено исследование антимикробной активности фосфорсодержащих модифицированных и немодифицированной углеродных тканей. Показано, что модификация антимикробными препаратами усиливает антимикробную защиту волокон. Углеродные волокна также можно защищать с помощью ионов серебра [40].

Кроме того, предполагают, что микроорганизмы могут попасть в ПКМ во время производства и хранения. Ухудшение свойств материалов наблюдали у армированных ПКМ, у которых преобладали грибковые загрязнения из-за их нестерильного хранения и производства [35].

В работе [41] показано выделение грибов из изоляционных материалов, изготовленных из стекловолокна. Сделано предположение, что микробное заражение могло произойти в процессе производства. В статье [16] предложен аналогичный источник микробного загрязнения композиционных материалов. О разложении силанового поверхностно-активного вещества на стекловолокне при использовании смеси анаэробных микроорганизмов представлено в работе [33]. Обнаружить разложение эпоксидных смол или виниловых эфиров не удалось. Следует отметить, что микробный консорциум, использованный в их исследовании, активен по отношению к металлам и обычно не встречается на полимерах.

Сообщается, что микроорганизмы обнаружены на поверхности космической станции «Мир». Биопленки представляют опасность для здоровья космонавтов. На станции обнаружили синегнойную палочку и наличие биodeградации полимерных материалов [22].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ также проводят исследования микробиологической стойкости образцов из полимерных материалов [42]. Результаты исследования показывают, что прочность при растяжении образцов, зараженных грибами, незначительно снижается (на ~4 %) по сравнению с контрольными образцами, что свидетельствует о минимальном уровне биodeградации образцов.

Заключения

Армированные ПКМ – достаточно новые материалы, которые применяют в авиакосмической промышленности. Их потребление с каждым годом увеличивается, что требует срочной оценки биodeградируемости.

Наблюдение за биodeградацией армированных ПКМ показывает, что материалы могут обеспечивать питательными веществами микроорганизмы для их роста и развития в окружающей среде. Поэтому выбор более устойчивых материалов, типов волокон, химических веществ для покрытия волокон и изготовления смол имеет важное значение при их долгосрочном использовании в космосе и авиации.

Незначительные химические изменения в локализованных областях ПКМ, вызванные жизнедеятельностью микроорганизмов, могут резко снизить производительность материала и ослабить его физические свойства.

Микроорганизмы колонизируются на поверхности полимерных материалов и ПКМ, армированных волокном [43]. Можно использовать различные методы, чтобы замедлить рост биопленок, например уменьшить относительную влажность воздуха, применить УФ-излучение и биоциды. Использование биоцидов, в свою очередь, требует тщательной оценки на предмет развития устойчивых популяций микроорганизмов.

В настоящее время остается нерешенным вопрос о влиянии биодegradации на механические свойства армированных ПКМ, хотя эксперименты по изучению этого явления проводили. Возможно, используемые методики не настолько чувствительны, чтобы заметить это влияние, а возможно, что биодegradация почти не влияет на механические свойства.

Знания о влиянии микроорганизмов на целостность ПКМ необходимы для оценки биоповреждений и для будущего развития устойчивых к этому воздействию материалов.

Список источников

1. 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.
2. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
3. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
4. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 3. Сравнение технологий ATL и AFP. Гибридная технология ATL/AFP // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 24.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-43-50.
5. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
6. Хрульков А.В., Тимошков П.Н., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы медико-биологического назначения (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 3–4 (30). Ст. 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 27.01.2022).
7. Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности состава полимерной матрицы и схем армирования трансмиссионных валов из полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.
8. Agarwal B.D., Broutman L.T. Analysis and Performance of Fiber Composites. New York: John Wiley & Sons Inc., 1990. 562 p.
9. Gu J.D., Ford T.E., Throp K.E.G., Mitchell R. Microbial Degradation of Polymeric Materials // Tri-Service Conference on Corrosion. Orlando, 1994. P. 1–12.
10. Rose A.H. Microbial Biodeterioration. New York: Academic Press, 1981. 516 p.
11. Little B.J., Wagner P., Maki J.S. et al. Factors influencing the adhesion of microorganisms to surfaces // Journal of Adhesion. 1986. Vol. 20. P. 187–210.
12. Gu J.-D., Mitchell R. Biodeterioration // The Prokaryotes / ed. E. Rosenberg. New York: Springer-Verlag, 2013. P. 309–342.
13. Flemming H.C. Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials // Polymer Degradation and Stability. 1998. Vol. 59. P. 309–315.
14. Thorp K.E.G., Crasto A.S., Gu J.-D., Mitchell R. Biodegradation of composite materials // Proceedings of the Tri-Service Conference on Corrosion. Washington: U.S. Government Printing House, 1994. P. 303–314.

15. Davies P., Mazeas F., Csari P. Sea water aging of glass reinforced composites: shear behavior and damage modeling // *Journal of Composite Materials*. 2001. Vol. 35. P. 1343–1372.
16. Gu J.-D., Ford T.E., Thorp K.E.G., Mitchell R. Microbial Growth on Fiber Reinforced Composite Materials // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 1996. Vol. 39. P. 197–204.
17. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Akhmetshin A.S., Stroganov I.V. Biodeterioration of Polymers and Polymer Composite Materials // *Polymer Science: Series D. Glues and Sealing Materials*. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 164–166.
18. Little B., Ray R., Wagner P. et al. Impact of biofouling on the electrochemical behavior of stainless steels in natural seawater // *Biofouling*. 1991. Vol. 3. P. 45–59.
19. Wagner P., Little B., Kevin R.H., Ray R.I. Biodegradation of Composite Materials // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 1996. Vol. 38. P. 125–132.
20. Pendry J.P. Microbially induced degradation of P55 graphite fibers // *Journal of The Electrochemical Society*. 1989. Vol. 136. P. 113.
21. Gu J.-D., Ford T.E., Thorp K.E.G., Mitchell R. Microbial deterioration of fiber reinforced composite materials // *International Conference on Microbial Induced Corrosion*. Texas: NACE International, 1995. P. 439–460.
22. Gu J.-D., Roman M., Esselman T., Mitchell R. The role of microbial biofilms in deterioration of space station candidate materials // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1998. Vol. 41. P. 25–33.
23. Gu J.-D., Lu C., Thorp K.E.G. et al. Fiber-reinforced polymeric composites are susceptible to microbial degradation // *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 1997. Vol. 18. P. 364–369.
24. Upsher F.J. Microbial attack on materials // *Proceedings The Royal Australian Chemical Institute*. 1976. Vol. 43–44. P. 173–176.
25. Tucker W.C., Brown R. Blister formation on graphite/polymer composites galvanically coupled with steel in seawater // *Journal of Composite Materials*. 1989. Vol. 23. P. 389–395.
26. Белик Е.С., Рудакова Л.В., Куликова Ю.В. и др. Оценка эффективности биodeградации полимерных композиционных материалов // *Вестник НВГУ*. 2017. № 4. С. 111–118.
27. Сакаева Э.Х., Куликова Ю.В., Рудакова Л.В. Биодеструкция полимерных композиционных материалов микроскопическими грибами // *Теоретическая и прикладная экология*. 2018. № 4. С. 68–75.
28. Imam M.A., Breister A.M., Zhou Zh. et al. Elucidating the Impact of Microbial Interactions on Fiber-Reinforced Polymer Composites // *35th Technical Conference of the American Society for Composites*. 2020. Vol. 1. P. 475–486.
29. Kablov E.N., Erofeev V.T., Zotkina M.M., Dergunova A.V., Moiseev V.V., Rimshin V.I. Plasticized epoxy composites for manufacturing of composite reinforcement // *Journal of Physics: Conference Ser. «International Conference on Engineering Systems 2020»*. 2020. P. 012031.
30. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites // *Journal of Physics: Conference Ser. «International Conference on Engineering Systems 2020»*. 2020. P. 012029.
31. Wagner P., Ray R., Hart K., Little B. Microbiological degradation of stressed fiber-reinforced polymeric composites // *Materials Performance*. 1996. Vol. 35. P. 79–82.
32. Breister A.M., Imam M.A., Zhichao Zho et al. Soil microbiomes mediate degradation of vinyl ester-based polymer composites // *Communication Materials*. 2020. Vol. 1 (101). P. 1–15.
33. Wagner P.A., Ray R.I., Little B.J. Microbiologically Influenced Degradation of Fiber Reinforced Polymeric Composites // *Materials Performance*. 1996. Vol. 33. No. 4. P. 46–49.
34. Gu J.D. Microbial colonization of polymeric materials for space applications and mechanisms of biodeterioration: A review // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2007. Vol. 59. P. 170–179.
35. Gu J.-D., Gu J.-G., Liu J., Cheng S.-P. Sensitive Detection on Polyimides Degradation by Microorganisms Using Electrochemical Impedance Spectroscopy // *Microbes and Environments*. 2002. Vol. 17. No. 2. P. 105–112.
36. Gu J.-D. Biodeterioration of synthetic polymeric materials: A review // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2003. Vol. 52. P. 69–91.

37. Mitchell R. A Study of Microbial Deterioration of Fiber Reinforced Composites and Protective Coatings. Washington DC: Air Force Office of Scientific Research, 1998. 22 p.
38. Triverdi J.P., Chatterjee R.C. Biodeterioration of aramid fibre by *Anthrenus flavipes* // *Journal of Materials Science Letters*. 1989. Vol. 8. P. 605–607.
39. Соловский М.В., Дубкова В.И., Крутько Н.П. и др. Антимикробная активность углеволокнистых тканей, модифицированных полимерным комплексом антибиотика гентамицина // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2009. Т. 45. № 2. С. 248–251.
40. Жуковский В.А., Хохлова В.А., Анущенко Т.Ю. и др. Серебросодержащие антимикробные материалы на основе углеродных и поливинилиденфторидных волокон // *Российский химический журнал*. 2011. Т. 55. № 3. С. 24–27.
41. Ezeonu I.M., Noble J.A., Simmons R.B. et al. Effect of relative humidity on fungal colonization of fiberglass insulation // *Applied and Environmental Microbiology*. 1994. Vol. 60. P. 2149–2151.
42. Кривушина А.А., Севастьянов Д.В., Шеин Е.А., Дасковский М.И., Усагава З., Авиллейра Г.П., Батиста М.Г. Исследование деструктивного воздействия штаммов микромицетов, выделенных в климатических условиях Республики Куба, на пленочные полимерные материалы // *Труды ВИАМ*. 2021. № 4 (98). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-141-150.
43. Кривушина А.А., Старцев В.О. Микромицеты-деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 1 (107). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.01.2022). DOI: 10.18557/2307-6046-2022-0-1-123-134.

References

1. Buznik V.M., Kablov E.N. Materials for the development of the Arctic and cold territories. Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 21.
2. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
3. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 2. Automated Fiber Placement (AFP). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
4. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 3. Comparison of ATL and AFP technologies. Hybrid technology of ATL/AFP. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 24, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-43-50.
5. Belinis P.G., Donetskiy K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
6. Khrulkov A.V., Timoshkov P.N., Yazvenko L.N., Usacheva M.N. Composite materials for medical and biological purposes (review). *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2018, no. 3–4 (30), paper no. 05. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: January 27, 2022).
7. Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of the structure and reinforcement transmission shafts made of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 9. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 24, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.
8. Agarwal B.D., Broutman L.T. Analysis and Performance of Fiber Composites. New York: John Wiley & Sons Inc., 1990, 562 p.

9. Gu J.D., Ford T.E., Thorp K.E.G., Mitchell R. Microbial Degradation of Polymeric Materials. Tri-Service Conference on Corrosion. Orlando, 1994, pp. 1–12.
10. Rose A.H. Microbial Biodeterioration. New York: Academic Press, 1981, 516 p.
11. Little B.J., Wagner P., Maki J.S. et al. Factors influencing the adhesion of microorganisms to surfaces. *Journal of Adhesion*, 1986, vol. 20, pp. 187–210.
12. Gu J.-D., Mitchell R. Biodeterioration. *The Prokaryotes*. Ed. E. Rosenberg. New York: Springer-Verlag, 2013, pp. 309–342.
13. Flemming H.C. Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials. *Polymer Degradation and Stability*, 1998, vol. 59, pp. 309–315.
14. Thorp K.E.G., Crasto A.S., Gu J.-D., Mitchell R. Biodegradation of composite materials. *Proceedings of the Tri-Service Conference on Corrosion*. Washington: U.S. Government Printing House, 1994, pp. 303–314.
15. Davies P., Mazeas F., Csari P. Sea water aging of glass reinforced composites: shear behavior and damage modeling. *Journal of Composite Materials*, 2001, vol. 35, pp. 1343–1372.
16. Gu J.-D., Ford T.E., Thorp K.E.G., Mitchell R. Microbial Growth on Fiber Reinforced Composite Materials. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1996, vol. 39, pp. 197–204.
17. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Akhmetshin A.S., Stroganov I.V. Biodeterioration of Polymers and Polymer Composite Materials. *Polymer Science: Series D. Glues and Sealing Materials*, 2009, vol. 2, no. 3, pp. 164–166.
18. Little B., Ray R., Wagner P. et al. Impact of biofouling on the electrochemical behavior of stainless steels in natural seawater. *Biofouling*, 1991, vol. 3, pp. 45–59.
19. Wagner P., Little B., Kevin R.H., Ray R.I. Biodegradation of Composite Materials. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1996, vol. 38, pp. 125–132.
20. Pendrys J.P. Microbially induced degradation of P55 graphite fibers. *Journal of The Electrochemical Society*, 1989, vol. 136, pp. 113.
21. Gu J.-D., Ford T.E., Thorp K.E.G., Mitchell R. Microbial deterioration of fiber reinforced composite materials. *International Conference on Microbial Induced Corrosion*, NACE International, 1995, pp. 439–460.
22. Gu J.-D., Roman M., Esselman T., Mitchell R. The role of microbial biofilms in deterioration of space station candidate materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1998, vol. 41, pp. 25–33.
23. Gu J.-D., Lu C., Thorp K.E.G. et al. Fiber-reinforced polymeric composites are susceptible to microbial degradation. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 1997, vol. 18, pp. 364–369.
24. Upsher F.J. Microbial attack on materials. *Proceedings The Royal Australian Chemical Institute*, 1976, vol. 43–44, pp. 173–176.
25. Tucker W.C., Brown R. Blister formation on graphite/polymer composites galvanically coupled with steel in seawater. *Journal of Composite Materials*, 1989, vol. 23, pp. 389–395.
26. Belik E.S., Rudakova L.V., Kulikova Yu.V. Evaluation of the effectiveness of biodegradation of polymer composite materials. *Vestnik NVGU*, 2017, no. 4, pp. 111–118.
27. Sakaeva E.Kh., Kulikova Yu.V., Rudakova L.V. Biodegradation of polymeric composite materials by microscopic fungi. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2018, no. 4, pp. 68–75.
28. Imam M.A., Breister A.M., Zhou Zh. et al. Elucidating the Impact of Microbial Interactions on Fiber-Reinforced Polymer Composites. *35th Technical Conference of the American Society for Composites*, 2020, vol. 1, pp. 475–486.
29. Kablov E.N., Erofeev V.T., Zotkina M.M., Dergunova A.V., Moiseev V.V., Rimshin V.I. Plasticized epoxy composites for manufacturing of composite reinforcement. *Journal of Physics: Conference Ser.: International Conference on Engineering Systems 2020*, 2020, pp. 12–31.
30. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Ser.: International Conference on Engineering Systems 2020*, 2020, pp. 12–29.
31. Wagner P., Ray R., Hart K., Little B. Microbiological degradation of stressed fiber-reinforced polymeric composites. *Materials Performance*, 1996, vol. 35, pp. 79–82.

32. Breister A.M., Imam M.A., Zhichao Zho et al. Soil microbiomes mediate degradation of vinyl ester-based polymer composites. *Communication Materials*, 2020, vol. 1 (101), pp. 1–15.
33. Wagner P.A., Ray R.I., Little B.J. Microbiologically Influenced Degradation of Fiber Reinforced Polymeric Composites. *Materials Performance*, 1996, vol. 33, no. 4, pp. 46–49.
34. Gu J.D. Microbial colonization of polymeric materials for space applications and mechanisms of biodeterioration: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2007, vol. 59, pp. 170–179.
35. Gu J.-D., Gu J.-G., Liu J., Cheng S.-P. Sensitive Detection on Polyimides Degradation by Microorganisms Using Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Microbes and Environments*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 105–112.
36. Gu J.-D. Biodeterioration of synthetic polymeric materials: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, vol. 52, pp. 69–91.
37. Mitchell R. A Study of Microbial Deterioration of Fiber Reinforced Composites and Protective Coatings. Washington DC: Air Force Office of Scientific Research, 1998, 22 p.
38. Triverdi J.P., Chatterjee R.C. Biodeterioration of aramid fibre by *Anthrenus flavipes*. *Journal of Materials Science Letters*, 1989, vol. 8, pp. 605–607.
39. Solovskii M.V., Dubkova V.I., Krutko N.P. Antimicrobial activity of carbon fiber tissues modified with a polymeric complex of the antibiotic gentamicin. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 248–251.
40. Zhukovsky V.A., Khokhlova V.A., Anushchenko T.Yu. Silver-containing antimicrobial materials based on carbon and polyvinylidene fluoride fibers. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 55, no. 3, pp. 24–27.
41. Ezeonu I.M., Noble J.A., Simmons R.B. et al. Effect of relative humidity on fungal colonization of fiberglass insulation. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, vol. 60, pp. 2149–2151.
42. Krivushina A.A., Sevastyanov D.V., Shein E.A., Daskovsky M.I., Usagawa Z., Avilleira G.P., Batista M.G. Study for destructive influence of micromycete strains, isolated under climatic conditions of the Republic of Cuba, on polymer film materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 31, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-141-150.
43. Krivushina A.A., Startsev V.O. Micromycetes-destructors of polymeric materials among extremophilic microorganisms (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: 31 January, 2022). DOI: 10.18557/2307-6046-2022-0-1-123-134.

Информация об авторах

Усачева Мария Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maria N. Usacheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Khrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.02.2022.
The article was submitted 17.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 22.02.2022.

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛИИМИДНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ (обзор)

М.И. Валуева¹, И.В. Зеленина¹, А.В. Начаркина¹, К.Р. Ахмадиева¹

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

Аннотация. Представлен обзор научно-технической информации в области технологических особенностей процесса получения высокотемпературных углепластиков на основе термореактивных полиимидных связующих. Приведены параметры формования и проведен их сравнительный анализ, области применения и рекомендуемые температуры эксплуатации высокотемпературных полиимидных углепластиков, разработанных и выпускаемых зарубежными компаниями, продукция которых успешно внедрена на практике в элементы конструкций изделий авиационно-космической техники.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), высокотемпературные ПКМ, высокотемпературные углепластики, полиимидные связующие, получение, переработка

Для цитирования: Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Ахмадиева К.Р. Технологические особенности получения высокотемпературных полиимидных углепластиков. Зарубежный опыт (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.

Scientific article

TECHNOLOGICAL FEATURES OF OBTAINING HIGH TEMPERATURE POLYIMIDE CARBONS. FOREIGN EXPERIENCE (review)

M.I. Valueva¹, I.V. Zelenina¹, A.V. Nacharkina¹, K.R. Ahmadiyeva¹

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 an overview of scientific and technical information in the field of technological features of the process of obtaining high-temperature carbon plastics based on thermosetting polyimide binders. The parameters of molding are given and their comparative analysis, areas of application and recommended operating temperatures of high-temperature polyimide carbon-fiber reinforced plastics, developed and produced by foreign companies, whose products have been successfully implemented in practice in structural elements of aerospace engineering products, are presented.

Keywords: polymer composite materials (PCMs), high temperature PCMs, high temperature carbon fiber reinforced plastics, polyimide binders, production, processing

For citation: Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Ahmadiyeva K.R. Technological features of obtaining high temperature polyimide carbons. Foreign experience (review). Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.

Введение

Создание перспективной техники основано на применении лучших достижений современного материаловедения – как в области самих материалов, так и технологических решений. В настоящее время сложно представить себе изделия, в которых не применялись бы полимерные композиционные материалы (ПКМ), позволяющие повысить весовую эффективность конструкций при обеспечении необходимых прочностных и функциональных характеристик. Благодаря высокой прочности, низкой плотности, химической и термической стойкости одну из ведущих позиций занимают углепластики [1–3].

Температура эксплуатации ПКМ определяется выбранным типом полимерного связующего и для стандартных высокопрочных углепластиков может достигать 180 °C. Однако для решения задач высокотемпературного применения ПКМ, в частности, углепластики должны обладать повышенной термоокислительной стабильностью, обеспечивающей максимальный уровень сохранения свойств при воздействии повышенных температур, величина которых определяется назначением конструкции и может составлять от 200 до 400 °C [4–13].

Одной из основных областей применения высокотемпературных материалов в мировой практике является авиационно-космическая отрасль. В том числе на европейском рынке рост спроса на высокотемпературные ПКМ стимулируют компании Dassault Aviation, BAE Systems, Airbus Group. Производителями различных классов связующих для высокотемпературных ПКМ за рубежом являются компании Cytac Solvay Group, Toray Advanced Composites, Hexcel Corporation, Renegade Materials Corporation, Teijin, Evonik, UBE Industries Ltd, Nexam Chemical [14].

В данной статье представлен обзор научно-технической информации в области технологических параметров процесса получения углепластиков на основе высокотемпературных термореактивных полиимидных связующих. Полиимидные материалы в дополнение к устойчивости к воздействию повышенных температур (250–320 °C) характеризуются высоким значением кислородного индекса, обладают пожаробезопасностью и радиационной стойкостью, что делает их перспективными материалами для применения в конструкциях изделий космической техники, судостроении и др. [11–13].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Зарубежный опыт получения высокотемпературных полиимидных углепластиков

Как известно из данных научно-технической литературы и отмечено авторами данной статьи в предыдущих работах [9, 10, 14], обеспечение максимального ресурса высокотемпературных ПКМ при повышенных температурах эксплуатации может быть реализовано только при выполнении заданных условий технологического процесса формообразования ПКМ (температура, давление), обеспечивающих полное протекание термохимических превращений и формирование заданной структуры композита.

В настоящее время за рубежом при изготовлении ПКМ, предназначенных для высокотемпературной эксплуатации, широкое применение находят полиимидные связующие [15–19]. Первое упоминание о синтезе ароматических полиимидов относится к 1908 г., первый промышленный синтез высокомолекулярных полиимидов реализован фирмой DuPont в 1960-х гг. [15].

В зависимости от химического строения органических радикалов, входящих в состав имидных группировок, различают ароматические, алифатические и алициклические полиимиды, а по форме цепей – линейные и трехмерные (пространственно-сетчатые) [13]. Наиболее широко применяемые полиимидные связующие можно разделить на следующие типы [9, 11–13, 19]:

- поликонденсационного типа, образующие при отверждении ароматический полиимид линейного строения;
- полимеризационного типа (polymerization of monomeric reactants (PMR) – полимеризация мономерных реагентов), отверждаемые по реакции полимеризации с образованием полиимида сетчатого строения;
- циклизованные олигоимиды (phenylethynyl-terminated polyimide (PETI) – полиимиды с концевыми фенилэтинильными группами), образующие при отверждении полиимид сетчатого строения.

Получение ПКМ на основе связующих поликонденсационного типа (Skybond, Pyralin PJ, СП-97) проводится технологически более просто реализуемым способом, так как температура их отверждения в едином цикле под давлением не превышает 200 °С, однако в процессе формообразования происходит выделение большого количества летучих продуктов (два примера приведены в табл. 1), в связи с чем получаемые ПКМ имеют высокую пористость [11], которая ограничивает возможности эффективного практического применения подобных материалов в условиях одновременного воздействия механических нагрузок, высоких температур и окислительной атмосферы [13].

Таблица 1

Параметры формообразования типовых полиимидных связующих поликонденсационного типа [11]

Связующее	Параметры формообразования			
	предотверждения	отверждения	термообработки в течение 4 ч	
			температура, °С	количество летучих продуктов, % (по массе)
Skybond	При 150 °С и давлении 0,125 МПа; при 200 °С и давлении 0,1 МПа; количество летучих продуктов: 10–15 % (по массе)	При 315 °С и давлении 1,75 МПа (1 ч); количество летучих продуктов: 5–6 % (по массе)	220	20–30
СП-97			260	
			315	
			330	
			370	

Применение для получения ПКМ связующих полимеризационного типа (PMR) позволяет избежать высокой пористости при отверждении получаемых материалов [13]. В связи с этим за рубежом ПКМ на основе связующих типа PMR являются наиболее распространенными материалами, применяемыми для создания объектов новой техники (например, фирмами Pratt & Whitney и General Electric) [15], в том числе их используют для изготовления более 30 крупногабаритных термоустойчивых конструкций авиакосмического назначения, включая закрылок кормовой части космического корабля Space Shuttle (со снижением за счет этого его массы на 35 % по сравнению с использованием алюминиевых конструкций) [11]. При отверждении ПКМ на основе связующих типа PMR материал формуют при ступенчатом повышении температуры до 320–350 °С с использованием прессовой или автоклавной технологии [13].

Рассмотрим более подробно процесс отверждения и технологические параметры получения углепластиков, используемые мировыми производителями термореактивных полиимидных связующих полимеризационного типа, на примере материалов фирм Toray Advanced Composites и Cytec Solvay Group, а также сравним с параметрами отверждения циклизованных полиимидов разработок фирм UBE Industries Ltd (Япония) и Nexam Chemical (Швеция) [14, 20–34].

Высокотемпературные материалы компании Toray Advance Composites (США), выпускающей ПКМ для изделий авиационной и аэрокосмической техники с диапазоном

рабочих температур от 80 до 320 °С, применяются для реверсоров тяги, опор и кожухов гондол авиационных двигателей, а также для антенн и отражателей спутников, стрелок и трубок ракет-носителей (для сборок опор, распорок и трубопроводов). Высокотемпературные ПКМ обеспечивают весовую эффективность при изготовлении теплозащитных экранов кожухов космических кораблей [21], обеспечивающих защиту от интенсивного нагрева во время входа в атмосферу на высокой скорости.

Высокотемпературные материалы фирмы Cytex Solvay Group предназначены для изготовления элементов конструкций реактивных двигателей: обводных каналов, крышек коробки передач, вентиляционных труб, статора вентилятора, узлов лопастей, сопловых клапанов, сердечников, сепараторов и подшипников [14].

В табл. 2 приведены перечень полиимидных углепластиков, разработанных за последние годы, и рекомендуемые температуры их эксплуатации [20–34].

Таблица 2

Полиимидные углепластики и рекомендуемые температуры их эксплуатации

Фирма	Материал	Температура стеклования отвержденной матрицы, °С		Рекомендованная рабочая температура*, °С
		T_g^{dry} (сухое состояние)	T_g^{wet} (влажное состояние)	
Toray Advance Composites (препреги)	RS-51 (AFRPE-4/AS4 или IM7)	366	–	316
	TC890 (900HT/T650-35 8HS)	454	–	316/288
Cytex Solvay Group	AVIMID® R /T650-35 8HS	305	253	280
	AVIMID® RB/T650-35 8HS	340	277	316/277
	CYCOM® 2237/ T650-35 8HS	338	265	288/260
Maverick Corporation	MVK-10/T650-35 CF, 8HS	305	250	До 288
	MVK-14 Freeform®/T650-35 CF, 8HS	318	247	288/232
Nexam Chemical	Neximid MHT-R/T650-35 8HS	400	–	–
UBE Industries Ltd	PETI-330/ T650-35 8HS	330	–	300
	PETI-365E/T800 12K	365	–	316/288

* В знаменателе – во влажном состоянии.

Достижение высоких рабочих температур ПКМ наряду с пониженной пористостью, требует иного подхода к технологии их изготовления.

Главным отличием полиимидных связующих типа PMR [11, 13] от полиимидных связующих поликонденсационного типа является наличие в составе связующего ненасыщенных концевых групп, способных полимеризоваться с образованием сетчатого полиимида на конечной стадии формования изделия без выделения летучих веществ.

Отверждение PMR-полиимидов является двухстадийным процессом:

– на первой стадии происходит образование линейных олигоимидов (поликонденсационный процесс с выделением низкомолекулярных веществ – аналогичен процессу отверждения связующих СП-97, Skybond, Pyralin PJ). Форполимер, полученный на данной стадии, представляет собой пористый хрупкий имидопласт;

– на второй стадии проходит высокотемпературная полимеризация линейных олигоимидов по ненасыщенным концевым группам с образованием сетчатого полиимида.

Выделение низкомолекулярных веществ, происходящее на первой стадии отверждения (поликонденсационный процесс), иллюстрирует усредненная кривая потери массы образца полиимидного связующего типа PMR-15, полученная методом термического анализа (рис. 1).

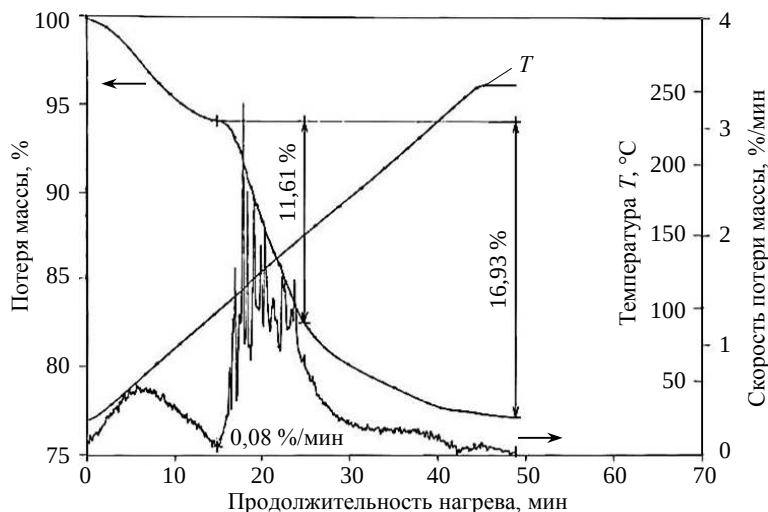


Рис. 1. Кривая потери массы образца полиимидного связующего типа PMR-15 при нагреве до 250 °C со скоростью 5 °C/мин [35]

Процесс имидизации происходит в интервале температур от 120 до 220 °C, потеря массы при этом за счет удаления летучих продуктов может достигать 10–15 %. Для обеспечения беспрепятственного и максимального удаления летучих продуктов используется вакуум, обеспечиваемый автоклавом.

Получившийся имидопласт при повышенной температуре образует расплав, вязкость которого снижается с ростом температуры, как показано на рис. 2. При достижении минимальной (или заданной) вязкости прикладывается давление, обеспечивающее получение монолитной полимерной матрицы, не имеющей пор.

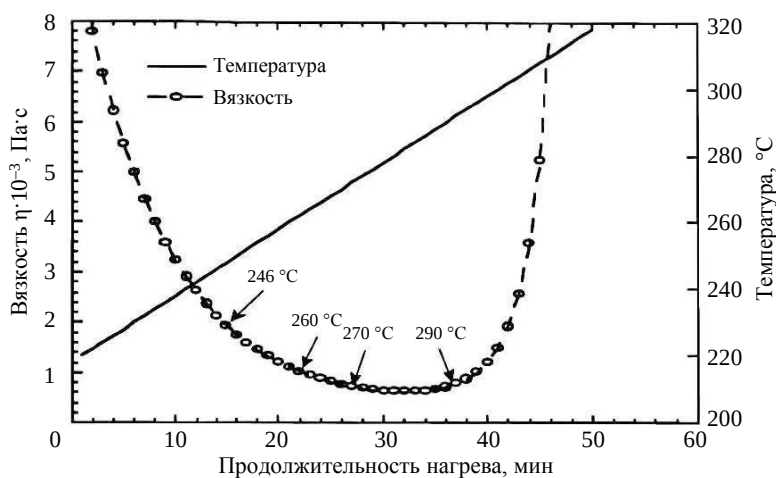


Рис. 2. Вязкость расплава связующего PMR-15 при динамическом нагреве со скоростью 2 °C/мин [35]

Еще одной технологической особенностью, обеспечивающей высокую термостойкость и прочность углепластиков на основе PMR имидных связующих, является наличие высокого давления на заключительной стадии формования при температуре 280–340 °С, так как при этой температуре происходит отверждение по концевым эндиковым группам: эндиковый цикл распадается с образованием малеинового цикла и циклопентадиена.

Повышенное давление предотвращает улетучивание пентадиена и обеспечивает его встраивание в структуру узлов сетки, повышая тем самым термоокислительную устойчивость полимерной матрицы, которая зависит от концентрации термически прочных циклов и узлов, образующихся из эндиковых концевых групп, и химического строения межузловых цепей [9, 11]. При соблюдении указанных условий преимуществами имидных связующих типа PMR являются низкая пористость отвержденных изделий (1–2 %) и высокий уровень сохранения прочностных свойств ПКМ при высокотемпературной эксплуатации.

В последнее время разработан ряд модификаций полиимидного связующего PMR-15 – например, в его составе токсичный 4,4'-метилendiанилин заменен на менее опасный продукт. Проводятся работы по расширению ассортимента мономеров, используемых при синтезе полиимидных связующих [16].

Первые варианты связующего PMR-15 предполагали изготовление препрегов по растворной технологии с использованием растворителей – метилпирролидона, метилового спирта, ксилола и подобных полярных растворителей [11, 13, 35–37], подлежащих в дальнейшем удалению, что негативно сказывается на экологии и увеличивает пористость изделий при неполном удалении растворителей. Дальнейшие разработки направлены на переход к расплавной технологии изготовления препрегов на полиимидных связующих либо на замену токсичных растворителей в составе связующего менее агрессивными – например, этиловым спиртом [13, 16].

Следует отметить, что препреги на основе расплавных полиимидных связующих имеют недостаточную липкость, это затрудняет процесс выкладки крупногабаритных и сложных деталей. Для повышения липкости и эластичности препрегов на основе PMR-связующих в их состав вводят активные разбавители, такие как стирол, 1-винил-2-пирролидон и т. д. [11, 12]. Однако современные производители препрегов [24] для повышения липкости и улучшения адгезии при выкладке полиимидного препрега рекомендуют применять нагревание (обогреваемая оснастка) или небольшое увлажнение путем распыления этанола из аэрозольного баллончика.

На рис. 3 графически представлены температурно-временные параметры автоклавного формования некоторых полиимидных углепластиков. На рис. 3, а приведен график формования углепластика на основе стандартного варианта связующего PMR-15, а на рис. 3, б и в – графики формования углепластиков по режимам, рекомендуемым основным производителем полиимидных препрегов – фирмой Cytac Solvay Group, а также углепластика PETI-365E/T800-12K производства фирмы UBE Industries Ltd. Для удобства сравнения температурно-временные графики формования углепластиков на основе полиимидных связующих различных марок приведены к единому виду.

На графиках, иллюстрирующих температурно-временной режим формования (рис. 3), видно, что используется вакуум двух уровней: на начальном этапе минимальный (6–13 кПа), а при температуре >200 °С максимально глубокий (95–100 кПа). Минимальный вакуум прикладывается, чтобы избежать потерь связующего в самом начале формования при активном выделении летучих продуктов в процессе имидизации.

Для реализации таких режимов формования требуются специальные высокотемпературные автоклавы (как правило, снабженные азотной станцией), обеспечивающие как вакуум, так и высокое давление формования (1,0–3,0 МПа) и температуру формования не менее 360–370 °С.

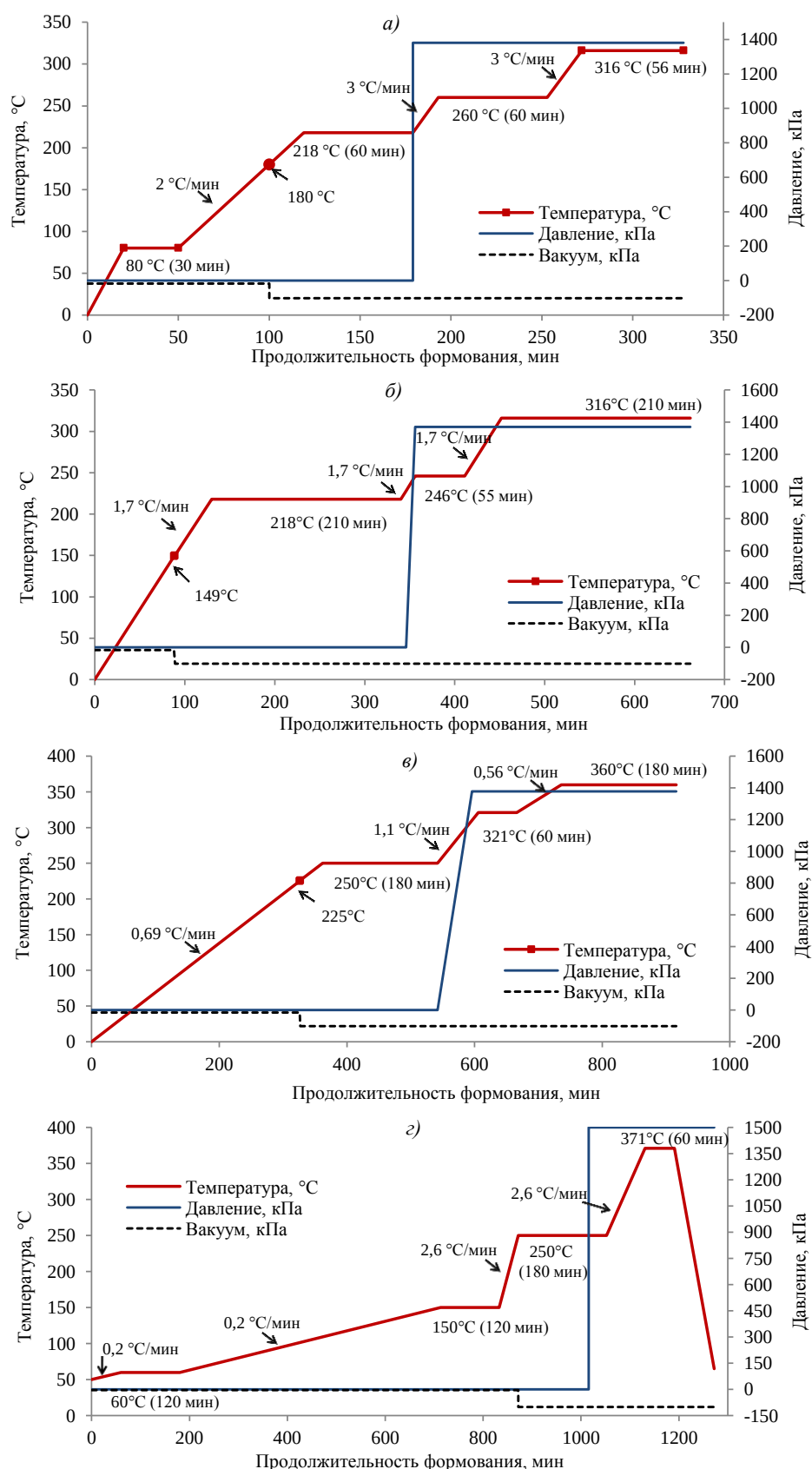


Рис. 3. Графики формования углепластиков на основе связующих PMR-15 [35] (а), CYCOM® 2237 [24] (б), AVIMID® R [22] (в) и углепластика PETI-365E/T800-12K [28] (г)

На рис. 4 приведена условная схема сборки пакета для автоклавного формования углепластика на основе полиимидного связующего CYCOM®2237. Видно, что при сборке пакета используется много вспомогательных материалов (вакуумные и разделительные пленки – гладкие и перфорированные, дренажные материалы, герметизирующие жгуты, материалы для оснастки и т. д.), а с учетом параметров формования вспомогательные материалы должны быть высокотемпературными – с рабочей температурой до 320–400 °С.

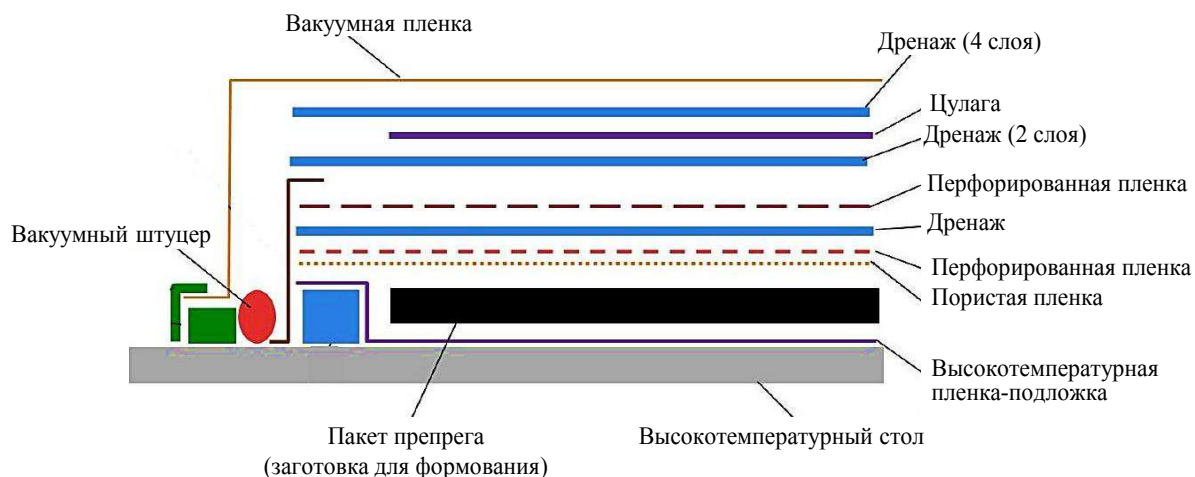


Рис. 4. Схема сборки пакета для автоклавного формования углепластика [24]

Альтернативой препреговой технологии изготовления ПКМ является метод RTM (Resin Transfer Molding), характеризующийся экологической чистотой, повышенной производительностью и выпуском высококачественной продукции. Этот метод позволяет исключить необходимость изготовления препрегов и их хранения, при этом уменьшаются капитальные затраты. Так, фирма Maverick Corporation разработала (коммерциализировала разработанную NASA) серию полиимидных связующих, являющихся оригинальной репликой связующего PMR-15 (марки J1, MVK-10, MVK-16), не содержащих 4,4'-метилendiанилина и предназначенных для изготовления изделий методом RTM. Методом RTM также рекомендуется перерабатывать углепластики на основе циклизованных полиимидов (марки PETI-330, NEXIMID_MHT-R) [25–34, 38]. Рассмотрим процесс изготовления углепластика методом RTM на примере полиимидного связующего PETI-330.

Полиимидные связующие, используемые для изготовления материалов методом RTM, поставляются в виде порошков (рис. 5), так как представляют собой уже готовый имидопласт – продукт, прошедший первую стадию отверждения с активным выделением летучих продуктов. Благодаря отсутствию выделения летучих продуктов в процессе дальнейшего отверждения вакуум не требуется, что позволяет использовать не только автоклав, но и пресс, а полимерная матрица получается беспористой.

На рис. 5 представлен внешний вид связующего PETI-330, а также динамическая вязкость его расплава. Минимальная вязкость расплава связующего PETI-330 при температуре 280 °С составляет 1,8–3,0 Па·с и сохраняется при этой температуре до 200 мин. Этого времени, как правило, достаточно, чтобы провести разогрев связующего до заданной температуры и обеспечить пропитку. Для других полиимидных связующих температура пропитки может быть как значительно меньше (от 200 до 250 °С), так и больше.

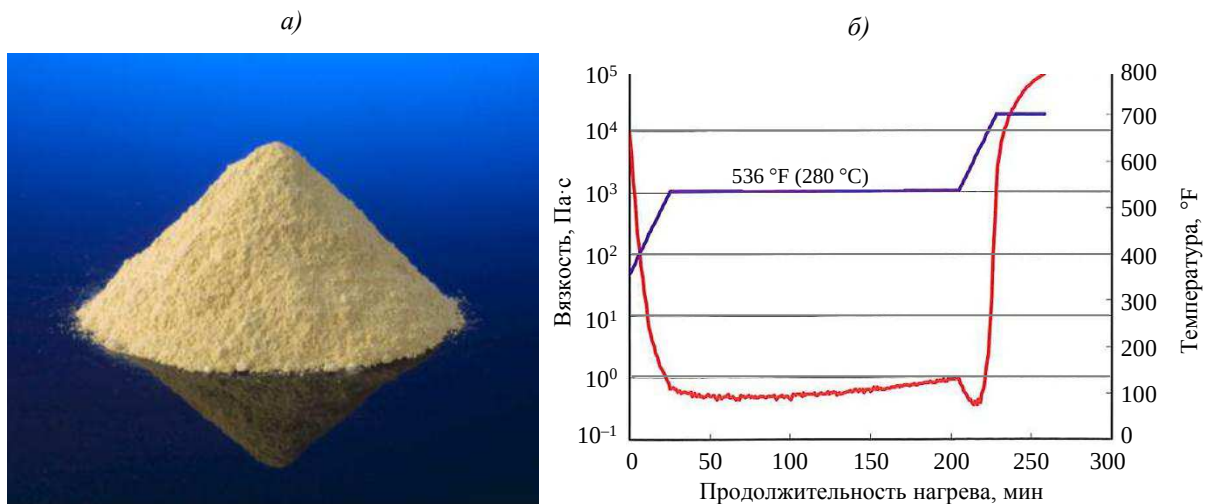


Рис. 5. Внешний вид связующего РЕТІ-330 (а) и динамическая вязкость его расплава (б) [27, 28]

На рис. 6 приведен график формования углепластика РЕТІ-330/Т650, на котором видно, что заключительную стадию отверждения (как и для углепластиков на основе РМР-препрегов) следует проводить под большим давлением. Для обеспечения технологического процесса изготовления полиимидных углепластиков методом RTM необходимо оснащение предприятий соответствующим высокотехнологичным оборудованием, позволяющим реализовать процесс пропитки расплавом связующего под давлением с последующим отверждением по заданному режиму.

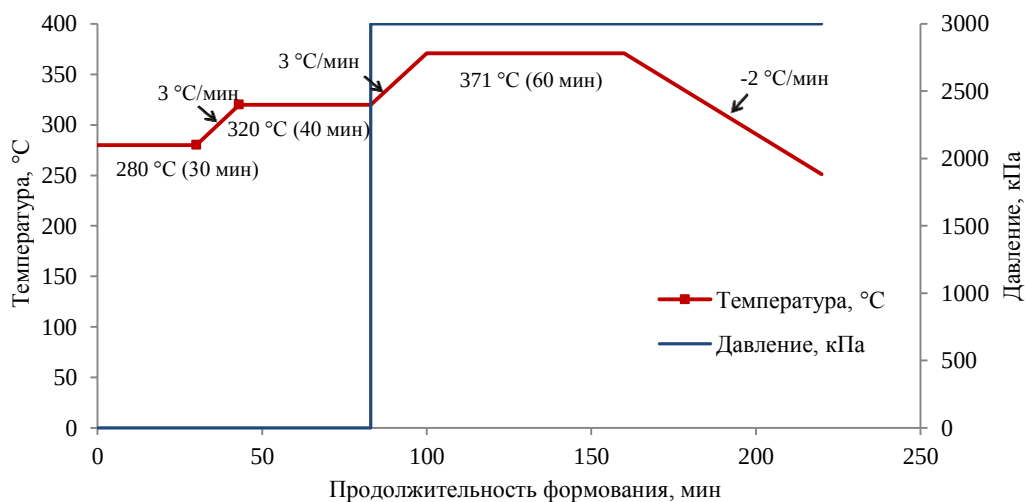


Рис. 6. График формования углепластика на основе связующего РЕТІ-330 [27, 28]

В табл. 3 приведены основные параметры формования высокотемпературных углепластиков на основе термореактивных полиимидных связующих.

Проведен сравнительный анализ технологических параметров отверждения углепластиков на основе полиимидных связующих. Несмотря на ряд различий – например, температура подачи давления колеблется от 218 до 310 °С или скорости нагрева и время выдержки отдельных стадий отверждения – можно отметить, что неизменным остается:

- необходимость использования вакуума (для автоклавного формования);

- высокая конечная температура формования – от 310 до 370 °С;
- высокое давление (от 1,0 до 3,0 МПа), поддерживаемое до окончания процесса формования;
- длительность процесса формования с последующим постотверждением.

Таблица 3

Параметры формования углепластиков на основе полиимидных связующих [20–34, 39]

Способ переработки	Углепластик	Технологические параметры				
		Давление формования, МПа	Температура подачи давления, °С	Конечная температура (°С) и время формования	Суммарное время формования, ч	Температура (°С) и время постотверждения
Автоклавное формование препрега	PMR-15	1,4	218	316, 56 мин	5,5	316, 4 ч
	RS-51 (AFRPE-4/AS4 или IM7)	1,379	280	371, 2 ч	10	400, 4 ч
	TC890 (900HT/T650-35 8HS)	1,40	300	371, 3 ч	15	Отсутствует
	AVIMID®R/T650-35 8HS	1,378	310	360, 3 ч	18,2	– «–»
	AVIMID®RB/T650-35 8HS	1,378	300	360, 3 ч	19,6	– «–»
	CYCOM®2237/T650-35 8HS	1,0–1,4	246	316, 3,5 ч	12	288±6, 5 ч; 316±6, 10 ч
	RP-46/IM7	1,38	246	316, 2 ч	8	350, 4 ч (вакуум)
	PETI-365E/T800-12K	1,5	250	371, 1 ч	20	Отсутствует
RTM-пропитка при температуре, °С:						
240	NEXIMID_MHT-R/T650	1,2	320	370, 2 ч	От 6 до 8	Инертная среда при 400–440 °С
280	PETI-330/T650	3	320	371, 1 ч	4	Отсутствует

Следует отметить, что НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ располагает высокотемпературным оборудованием, необходимым для реализации полного цикла формования (отверждения) и термообработки (постотверждения), включая автоклав с азотной станцией для формования под давлением при температурах до 400 °С; гидравлические прессы с температурой эксплуатации от 300 °С; высокотемпературные шкафы с температурой эксплуатации до 650 °С для термообработки, в том числе в контролируемой атмосфере; муфельные печи.

С применением перечисленного оборудования выполнена новая разработка НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – высокотемпературный углепластик марки ВКУ-61 на основе расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа марки ВС-51. Данные об основных механических свойствах углепластика приведены в источниках [5, 10], результаты исследований их сохранения под влиянием лабораторно имитируемого воздействия эксплуатационных факторов будут рассмотрены в последующих работах. В числе новых высокотемпературных разработок также стеклопластик марки ВПС-72, клей марки ВК-103 и полимерный наполнитель-сферопластик марки ВПЗ-24 [40–42].

Обсуждение и заключения

Мировые производители авиационно-космической и другой техники, элементы конструкций которой подвергаются воздействию повышенных температур при эксплуатации или к которым предъявляются высокие требования по пожаробезопасности, применяют для решения поставленных задач высокотемпературные ПКМ – в частности, углепластики на основе термореактивных полиимидных связующих типа PMR.

Обеспечение низкой пористости, термоокислительной стабильности и максимального сохранения показателей прочности в процессе высокотемпературной эксплуатации при повышенных температурах может быть реализовано только при выполнении заданных условий технологического процесса формообразования ПКМ (температура, давление), обеспечивающих полное протекание термохимических превращений и формирования заданной структуры композита.

В соответствии с опытом зарубежных компаний (Cytac Solvay Group, Toray Advanced Composites и др.) для обеспечения реализации максимального уровня свойств и ресурса высокотемпературной эксплуатации ПКМ на основе наиболее широко применяемых при создании ПКМ конструкционного назначения полиимидных связующих полимеризационного типа, успешно внедряются полиимидные ПКМ в теплонагруженные конструкции самолетов (двигатели), спутников (антенны и отражатели), ракет-носителей (сборки опор, распорки и трубопроводы) и др. Процесс получения ПКМ характеризуется следующими технологическими особенностями: необходимость использования вакуума (для автоклавного формования); высокое давление формования ($\geq (1,0-1,4)$ МПа); конечная температура отверждения полиимидных ПКМ под давлением должна составлять не менее 300 °С, температура постотверждения ~315 °С. Приближение параметров переработки полиимидов к традиционным связующим приводит к снижению температуры стеклования ПКМ и их устойчивости к высокотемпературной эксплуатации. Для реализации необходимых условий получения полиимидных ПКМ требуются соответствующие высокотемпературное оборудование и вспомогательные материалы на рабочую температуру до 320–400 °С.

Список источников

1. Kablov E.N. New generation Materials and technologies for their digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
4. 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.
5. Валуева М.И., Зеленина И.В., Ахмадиева К.Р., Жаринов М.А., Хасков М.А. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области высокотемпературных углепластиков: направления и перспективы // Материалы IV Всерос. конф. «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (г. Москва, 28 июня 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 71–76. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.

8. Способ получения расплавных полиимидных связующих полимеризационного типа: пат. РФ 2666734. № 2017135540; заявл. 05.10.17; опубл. 12.09.18.
9. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
10. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Хасков М.А. Высокотемпературные углепластики на основе термореактивного полиимидного связующего // Вопросы материаловедения. 2020. № 3 (103). С. 89–102.
11. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
12. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
13. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
14. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
15. Yang S.-Y., Advance polyimide materials: synthesis, characterization, and applications. 1st ed. Elsevier, 2018. 498 p.
16. Médard Abadie M.J. High Performance Polymers – Polyimides Based – From Chemistry to Applications. Croatia: INTECH, 2012. 244 p.
17. Кузнецов А.А., Семенова Г.К. Перспективные высокотемпературные термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов // Российский химический журнал. 2010. Т. 53. № 4. С. 86–96.
18. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих // Вопросы материаловедения. 2016. № 4. С. 50–62.
19. Cho D., Drzal L.T. Phenylethynyl-terminated polyimide, exfoliated graphite nanoplatelets, and the composites: an overview // Carbon letters. 2016. Vol. 19. P. 1–11.
20. Aerospace. Advance Composite Materials Selector Guide // Toray Advanced Composites. URL: https://www.toraytac.com/media/ca3eea73-6961-4ea8-adc7-5d1b861684f6/Bxgrfg/TAC/Documents/Selector%20Guides/Toray_Advanced_Composite_Material_Portfolio_Selector_Guide.pdf (дата обращения: 04.12.2021).
21. Whitley K.S., Collins T.J. Mechanical Properties of T650-35/AFR-PE-4 at Elevated Temperatures for Lightweight Aeroshell Designs // NASA Langley Research Center. URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060013437> 2018-02-25T20:16:46+00:00Z (дата обращения: 04.12.2021).
22. Solvay Avimid®R Polyimide Composite. URL <https://matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3dcb6c37bd39469c8e92b27045a13ea4> (дата обращения: 04.12.2021).
23. Solvay Avimid®RB Polyimide Composite. Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2012. AECM-00052. URL: <https://www.solvay.com/en/brands/avimid> (дата обращения: 04.12.2021).
24. CYCOM®2237 Polyimide Resin System. Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2012. AECM-00034. URL: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-2237> (дата обращения: 04.12.2021).
25. MVK-10. RTM Polyimide. Product description // Maverick Corp. URL: http://www.maverickcorp.com/_CE/pagecontent/Documents/MVK-10.pdf (дата обращения: 04.12.2021).

26. MVK-14 FREEFORM[®]. High temperature polyimide // Maverick Corp. URL: <http://www.maverickcorp.com/high-temperature-resins/material-options-high/mvk-14-freeform/> (дата обращения: 04.12.2021).
27. Bain S., Ozawa S., Jim M. Criss Jr. Development of a Cure/Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding // High Performance Polymers. 2006. URL: https://www.academia.edu/5559484/Development_of_a_Cure_Postcure_Cycle_for_PETI-330_Laminates_Fabricated_by_Resin_Transfer_Molding (дата обращения: 04.12.2021).
28. High temperature composite materials // UBE Industries Ltd. 2007. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/high-temperature-composite-materials-upilex-5a5302.html> (дата обращения: 04.12.2021).
29. Connell J.W., Smith J.G., Jr., Hergenrother P.M., Criss J.M. High Temperature Transfer Molding Resins: Status of PETI-298 and PETI-330 // NASA. URL: <https://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/NASA-2003-35sampe-jwc.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
30. Ghose S., Cano R.J., Watson K.A. et al. High temperature VARTM of phenylethynyl terminated imides // NASA. URL: <https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Industry/AEROSPACE%20APPLICATIONS/A2.8%20Ghose.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
31. Fernberg P., Gong G., Mannberg P. Processing and properties of new polyimide composites with high temperature ability // ECCM16 – 16th European Conference on Composite Materials (Seville, 22–26 June 2014). URL: <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0600.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
32. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Development of novel high Tg polyimide-based composites. Part II: Mechanical characterization // Journal of Composite Materials. 2018. Vol. 52. No. 2. P. 261–274.
33. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Mechanical performance on novel high Tg polyimide matrix carbon fibre-reinforced laminates // 20th International Conference on Composite Materials (Copenhagen, 19–24 July 2015). URL: <https://iccm-central.org/Proceedings/ICCM20proceedings/papers/paper-3213-1.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
34. Varna J., Zrida H. Analysis of Microdamage in Thermally Aged CF/Polyimide Laminates // Mechanics of Composite Materials. 2017. Vol. 53. No. 1. P. 45–58.
35. Lee C.-S. A process simulation model for the manufacture of composite laminates from fiber-reinforced, polyimide matrix prepreg materials: a dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics. Blacksburg, 1993. 205 p.
36. Wilson D. PMR-15 Processing, Properties and Problems – a Review // British Polymer Journal. 1988. No. 20. P. 405–416.
37. Sheppard C.H., Hoggatt J.T., Symonds W.A. Quality control developments for graphite/PMR-15 polyimide composites materials. NASA, 1979. 181 p.
38. RTM and RI processable polyimide resins: pat. US 7129318 B2; filed 30.08.04; publ. 31.10.06.
39. Thamilselvan G. Methodology for fabricating high temperature composite panel and evaluation. Toronto, 2011. 98 p.
40. Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Курносов А.О., Гуняева А.Г. Стеклопластики на основе термореактивных полиимидных связующих // Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности»: материалы конф. (Москва, 23 окт. 2020 г.). URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1294.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
41. Жаринов М.А., Петрова А.П., Бабчук И.В., Ахмадиева К.Р. Теплостойкие полиимидные конструкционные клеи (обзор) // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 4. С. 2–8.
42. Долматовский М.Г., Соколов И.И., Степанов А.В. Разрушение и контроль сотовых конструкций со сферопластиками // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 2. С. 97–103.

References

1. Kablov E.N. New generation Materials and technologies for their digital Processing. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
2. Kablov E.N. Materials of a new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. Intellect i tekhnologii, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. Metally of Evrazii, 2015, no. 1, pp. 36–39.
4. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). Aviacionnye materialy i tekhnologii, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Valueva M.I., Zelenina I.V., Akhmadieva K.R., Zharinov M.A., Khaskov M.A. Developments of FSUE "VIAM" in the field of high-temperature carbon plastics: directions and prospects. Materials of IV All-Rus. conf. *"The role of fundamental research in the implementation of the "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 71–76.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aero-space engineering: past, present and future (review). Trudy VIAM, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. Trudy VIAM, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
8. Way of receiving rasplavny poliimidny binding polimerizatsionny type: pat. 2666734 Rus. Federation, no. 2017135540; filed 05.10.17; publ. 12.09.18.
9. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmadieva K.R., Zelenina I.V. Features and properties of solvent-free PMR-type polyimide resin. Trudy VIAM, 2018, no. 12 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
10. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Khaskov M.A. High-temperature carbon plastics based on thermosetting polyimide binder. Voprosy materialovedeniya, 2020, no. 3 (103), pp. 89–102.
11. Mikhailin Yu.A. Heat-resistant polymers and polymeric materials. St. Petersburg: Professiya, 2006, 624 p.
12. Mikhailin Yu.A. Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2011, 416 p.
13. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. Polymer composite materials: structure, properties, technology: textbook. St. Petersburg: Profession, 2008, 560 p.
14. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Akhmadieva K.R. World market of high temperature polyimide carbon plastic (review). Trudy VIAM, 2019, no. 12 (84), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
15. Yang S.-Y., Advance polyimide materials: synthesis, characterization, and applications. 1st ed. Elsevier, 2018, 498 p.
16. Médard Abadie M.J. High Performance Polymers – Polyimides Based – From Chemistry to Applications. Croatia: INTECH, 2012, 244 p.
17. Kuznetsov A.A., Semenova G.K. Promising high-temperature thermosetting binders for polymer composite materials. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal, 2010, vol. 53, no. 4, pp. 86–96.
18. Kurnosov A.O., Raskutin A.E., Mukhametov R.R., Melnikov D.A. Polymer composite materials based on thermosetting polyimide binders. Voprosy materialovedeniya, 2016, no. 4, pp. 50–62.
19. Cho D., Drzal L.T. Phenylethynyl-terminated polyimide, exfoliated graphite nanoplatelets, and the composites: an overview. Carbon letters, 2016, vol. 19, pp. 1–11.

20. Aerospace. Advance Composite Materials Selector Guide. Available at: https://www.toraytac.com/media/ca3eea73-6961-4ea8-adc7-5d1b861684f6/Bxgrfg/TAC/Documents/Selector%20Guides/Toray_Advanced_Composite_Material_Portfolio_Selector_Guide.pdf (accessed: December 4, 2021).
21. Whitley K.S., Collins T.J. Mechanical Properties of T650-35/AFR-PE-4 at Elevated Temperatures for Lightweight Aeroshell Designs. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=200600134372018-02-25T20:16:46+00:00Z> (accessed: December 4, 2021).
22. Solvay Avimid® R Polyimide Composite. Available at: <https://matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3dcb6c37bd39469c8e92b27045a13ea4> (accessed: December 4, 2021).
23. Solvay Avimid® RB Polyimide Composite. Available at: <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=d3d9f6997a2145d087bfc9342a8ee61b> (accessed: December 4, 2021).
24. CYCOM® 2237. Solvay. 2012. Available at: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-2237> (December 4, 2021).
25. MVK-10. RTM Polyimide. Product description. Available at: http://www.maverickcorp.com/_CE/pagecontent/Documents/MVK-10.pdf (December 4, 2021).
26. MVK-14 FREEFORM®. High temperature polyimide. Available at: <http://www.maverickcorp.com/high-temperature-resins/material-options-high/mvk-14-freeform/> (accessed: December 4, 2021).
27. Bain S., Ozawa S., Jim M. Criss Jr. Development of a Cure/Postcure Cycle for PETI-330 Laminates Fabricated by Resin Transfer Molding. Available at: https://www.academia.edu/5559484/Development_of_a_Cure_Postcure_Cycle_for_PETI-330_Laminates_Fabricated_by_Resin_Transfer_Molding (accessed: December 4, 2021).
28. High temperature composite materials. Available at: <https://pdf4pro.com/amp/view/high-temperature-composite-materials-upilex-5a5302.html> (accessed: December 4, 2021).
29. Connell J.W., Smith J.G., Jr., Hergenrother P.M., Criss J.M. High Temperature Transfer Molding Resins: Status of PETI-298 and PETI-330. Available at: <https://www.cs.odu.edu/~mln/ltrs-pdfs/NASA-2003-35sampe-jwc.pdf> (accessed: December 4, 2021).
30. Ghose S., Cano R.J., Watson K.A. et al. High temperature VARTM of phenylethynyl terminated imides. Available at: <https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Industry/AEROSPACE%20APPLICATIONS/A2.8%20Ghose.pdf> (accessed: December 4, 2021).
31. Fernberg P., Gong G., Mannberg P. Processing and properties of new polyimide composites with high temperature ability. ECCM16 – 16th European Conference on Composite Materials. Available at: <http://www.escm.eu.org/eccm16/assets/0600.pdf> (accessed: December 4, 2021).
32. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Development of novel high Tg polyimide-based composites. Part II: Mechanical characterization. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 261–274.
33. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Mechanical performance on novel high Tg polyimide matrix carbon fibre-reinforced laminates. 20th International Conference on Composite Materials. Available at: <https://iccm-central.org/Proceedings/ICCM20proceedings/papers/paper-3213-1.pdf> (accessed: December 4, 2021).
34. Varna J., Zrida H. Analysis of Microdamage in Thermally Aged CF/Polyimide Laminates. *Mechanics of Composite Materials*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 45–58.
35. Lee C.-S. A process simulation model for the manufacture of composite laminates from fiber-reinforced, polyimide matrix prepreg materials: a dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering Mechanics. Blacksburg, 1993, 205 p.
36. Wilson D. PMR-15 Processing, Properties and Problems – a Review. *British Polymer Journal*, 1988, no. 20, pp. 405–416.
37. Sheppard C.H., Hoggatt J.T., Symonds W.A. Quality control developments for graphite/PMR-15 polyimide composites materials. NASA, 1979, 181 p.
38. RTM and RI processable polyimide resins: pat. US 7129318 B2; filed 30.08.04; publ. 31.10.06.
39. Thamilselvan G. Methodology for fabricating high temperature composite panel and evaluation. Toronto, 2021, 98 p.

40. Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Kurnosov A.O., Gunyaeva A.G. Glass-reinforced plastics based on thermosetting polyimide binders. All-Rus. Sci.-Tech. Conf. "Polymer composite materials of a new generation for civil industries": proceedings of conf. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1294.pdf> (accessed: December 4, 2021).
41. Zharinov M.A., Petrova A.P., Babchuk I.V., Akhmadieva K.R. Heat-resistant polyimide structural adhesives (review). Klei. Germetiki. Tekhnologii, 2021, no. 4, pp. 2–8.
42. Dolmatovsky M.G., Sokolov I.I., Stepanov A.V. Destruction and control of honeycomb structures with spheroplasts. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov, 2009, no. 2, pp. 97–103.

Информация об авторах

Валуева Мария Игоревна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленина Ирина Викторовна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ахмадиева Ксения Расимовна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maria I. Valueva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Zelenina, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastacia V. Nacharkina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ksenia R. Ahmadiyeva, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.12.2021.

The article was submitted 24.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 28.12.2021.

Научная статья

УДК 546.65

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107

ЗАЩИТНОЕ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЕ ПОКРЫТИЕ МАГНИТОВ СИСТЕМЫ РЗМ–Fe–B

С.А. Демин¹, С.В. Заварзин¹, И.В. Чередниченко¹, И.А. Козлов¹

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

Аннотация. При современных тенденциях к экономии и повышению эффективности использования электроэнергии магнитные материалы системы Nd–Fe–B находят широкое применение при производстве полностью электрических транспортных средств: автомобилей (Tesla), авиационной техники, а также в новых источниках энергии – например, в ветрогенераторах. Рассмотрены различные способы нанесения защитных покрытий на магнитные материалы системы Nd–Fe–B, режимы подготовки поверхности и произведена оценка влияния технологии нанесения противокоррозионных покрытий на их защитную способность, величину остаточной индукции и коэрцитивной силы по намагниченности магнитных материалов.

Ключевые слова: постоянные магниты, редкоземельные магниты Nd–Fe–B, электролитические покрытия, гальванические покрытия, никелирование, защита от коррозии, ионно-плазменные покрытия

Для цитирования: Демин С.А., Заварзин С.В., Чередниченко И.В., Козлов И.А. Защитное противокоррозионное покрытие магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.

Scientific article

PROTECTIVE ANTICORROSIVE COATING OF MAGNETS OF THE REM–Fe–B SYSTEM

S.A. Demin¹, S.V. Zavarzin¹, I.V. Cherednichenko¹, I.A. Kozlov¹

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 the current trends towards saving and increasing the efficiency of electricity use, magnetic materials of the Nd–Fe–B system are widely used in the production of fully electric vehicles: cars (Tesla), aircraft, as well as new energy sources – for example, wind turbines. Considers various methods of applying protective coatings to magnetic materials of the Nd–Fe–B system, surface preparation modes and evaluates the effect of the technology of applying anticorrosive coatings on their protective ability, the magnitude of residual induction and coercive force on the magnetization of magnetic materials.

Keywords: permanent magnets, rare earth magnets Nd–Fe–B, electrolytic coatings, electroplating, nickel plating, corrosion protection, ion-plasma coatings

For citation: Demin S.A., Zavarzin S.V., Cherednichenko I.V., Kozlov I.A. Protective anticorrosive coating of magnets of the REM–Fe–B system. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.

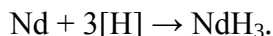
Введение

При работе в условиях воздействия коррозионно-активных и агрессивных сред повышение уровня эксплуатационных показателей достигается улучшением свойств поверхности изделия – формированием на ней покрытий, обладающих высоким уровнем требуемых свойств – износостойкости, твердости, жаростойкости, коррозионной стойкости и др. [1–5].

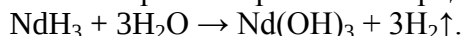
Фаза, богатая неодимом, имеет важное значение в магнитном упрочнении и способствует повышению уровня свойств магнитных материалов системы Nd–Fe–B [6–8]. Химическая активность фаз, богатых неодимом, очень высока, поэтому такие фазы легко подвержены коррозии и активно взаимодействуют с водой с выделением атомарного водорода [9]:



Выделяющийся водород образует гидриды с химически активной фазой магнитных материалов:



Образующиеся гидриды неодима обладают еще большей химической активностью и значительно увеличивают скорость образования продуктов коррозии:



Ускоренные коррозионные испытания свидетельствуют о крайне низкой стойкости магнитных материалов системы Nd–Fe–B в условиях воздействия повышенной влажности и наличия хлорид ионов, которые являются активаторами коррозионного процесса [10–12].

На рис. 1 представлен внешний вид образцов магнита системы Nd–Fe–B без защитных покрытий после коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ).



Рис. 1. Внешний вид магнита системы Nd–Fe–B в исходном состоянии (а) и после коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 15 мин (б) и 24 ч (в)

Уже через 15 мин экспозиции в КСТ наблюдается образование цветов побежалости и начало образования продуктов коррозии железа бурого цвета, а через сутки экспозиции площадь коррозионных поражений составляет 100 % от площади магнита. Интенсивные коррозионные процессы приводят к разрушению матричной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, что приводит к механическому разрушению данных материалов вследствие их высокой хрупкости [13–18].

Для предотвращения коррозии стальной основы и матричной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ на материалы наносят различные системы гальванических покрытий на основе никеля. При определенных режимах нанесения возможно получение беспористых покрытий, что предотвращает контакт основного материала с коррозионно-активной средой, особенно содержащей хлорид-ионы Cl^- [19].

Для повышения декоративности магнитных материалов наносят медное покрытие, которое способствует снижению шероховатости многослойных покрытий, снижению числа пор и позволяет наносить финишное блестящее никелевое покрытие [20].

Значение потенциала систем покрытий на основе никеля является катодным по отношению к стальной основе и способствует ускоренному развитию коррозионного процесса при механических повреждениях магнитных материалов (сколов, трещин).

Применение многослойных покрытий значительно увеличивает трудоемкость процесса их нанесения, зачастую требуется дополнительное окрашивание эпоксидными эмалями для увеличения защитной способности покрытий [21].

Наиболее эффективными покрытиями для защиты от коррозии являются покрытия, имеющие более отрицательное значение электрохимического потенциала по отношению как к стальной основе, так и к матричной фазе, содержащей неодим. При небольших нарушениях покрытий такого типа наблюдается активный коррозионный процесс, вызванный анодным растворением защитного покрытия и не затрагивающий основного металла [22]. Наиболее эффективными покрытиями жертвенного типа по отношению к стали являются цинковые и кадмиевые покрытия. Цинковые покрытия обеспечивают наибольшую разницу потенциалов по отношению к стальной основе, что и объясняет их высокую скорость коррозии в условиях воздействия повышенной влажности и в присутствии хлорид-ионов. Кадмиевые покрытия обладают повышенной защитной способностью и коррозионной стойкостью в этих условиях.

Материалы и методы

Для вакуумно-дугового нанесения противокоррозионных покрытий выплавлены катоды из никелевого сплава марки СДП-1Т и алюминиевого сплава марки ВСДП-13.

Шероховатость поверхности образцов после активации и нанесения защитных покрытий измеряли на профилометре Olympus LEXT OLS4100 по ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Шероховатость оценивали по величине среднего арифметического отклонения профиля шероховатости (R_a).

Для оценки эффективности защитных покрытий проведены ускоренные коррозионные испытания в КСТ в соответствии с ГОСТ 9.308–85 (метод 1) с непрерывным распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия в течение 720 ч.

Исследования микроструктуры защитных покрытий проводили на металлографическом микроскопе Olimpus GX 51 с цифровой системой обработки изображения при увеличении $\times 500$.

Коррозионные свойства образцов в виде рабочих электродов оценивали путем измерения электрохимических характеристик в 3 %-ном растворе хлорида натрия при температуре 20 ± 5 °С. Для измерений использовали прижимную трехэлектродную ячейку объемом 250 мл при площади контакта 1 см^2 . Потенциал рабочего электрода измеряли относительно хлоридсеребряного (Ag/AgCl) электрода сравнения $E = +197 \pm 3$ мВ/н.в.э. Противоеlectродом служила платиновая сетка. Исследование проводили на потенциостате/гальваностате Solartron 1287 при управлении программным обеспечением CorrWare, обработку результатов производили с помощью программы CView.

Цель данной работы – изучение коррозионного поведения магнитных материалов, содержащих неодим (Nd), разработка метода подготовки поверхности магнитных материалов под нанесение гальванических покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний и электрохимических исследований многослойных гальванических покрытий на магнитных материалах.

Результаты и обсуждение

Для защиты от коррозионного повреждения магнитов системы РЗМ*–Fe–В в рамках исследования предложены следующие варианты противокоррозионных покрытий:

* Редкоземельные металлы.

- покрытие системы Co–Cr–Al–Ti–Y, сформированное при распылении катода из никелевого сплава марки СДП-1Т;
- покрытие системы Al–Ni–Si–Y, сформированное при распылении катода из алюминиевого сплава марки ВСДП-13;
- гальваническое покрытие никель–медь–никель–олово;
- гальваническое кадмиевое и цинковое покрытия;
- гальваническое покрытие никель–цинк.

Присутствие матричной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ из-за повышенной химической активности значительно затрудняет нанесение гальванических покрытий вследствие интенсивного взаимодействия с компонентами электролитов, в связи с чем выбор метода подготовки поверхности является актуальной задачей.

Для повышения адгезионных свойств защитных покрытий может быть использовано химическое активирование в растворах кислот для создания необходимой шероховатости поверхности. Для предотвращения растворения матричной фазы магнитных материалов в электролитах для нанесения гальванических покрытий, необходимо создание пассивной пленки.

В табл. 1 представлены растворы для подготовки поверхности магнитов перед нанесением защитных покрытий.

Таблица 1

Состав растворов для активации поверхности магнитов перед нанесением защитных покрытий

Условный номер раствора	Состав раствора	Убыль массы, г	Средние значения шероховатости (R_a), мкм	
			в исходном состоянии	после обработки
1	100 г/л соляной кислоты + 45 г/л уротропина	2,32	0,9	1,9
2	25 г/л соляной кислоты + 65 г/л серной кислоты	2,38		1,0
3	На основе фторидов	0,24		0,7

Особенностью подготовки поверхности магнитов системы Nd–Fe–B является их высокая химическая активность в растворах кислот, что приводит к сильному растраву и повышенному шламообразованию на поверхности магнита и, как следствие, к ухудшению качества нанесенных защитных покрытий. На рис. 2 представлен внешний вид магнита системы Nd–Fe–B с защитным цинковым покрытием, полученным после различных способов подготовки поверхности.



Рис. 2. Внешний вид магнита системы Nd–Fe–B с защитным цинковым покрытием в зависимости от способа подготовки поверхности – активации в растворах 1 (а) и 2 (б), а также в растворе на основе фторидов 3 (в)

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для активации поверхности магнитов системы Nd–Fe–В предложен состав на основе фторидов, образующий на поверхности пленку, которая защищает от дальнейшего растворения активной матрицы не только в растворе для активации поверхности, но и в растворах электролитов, что позволяет наносить различные защитные гальванические покрытия.

Для повышения адгезионных свойств покрытий, наносимых вакуумно-дуговым методом, требуется пескоструйная обработка поверхности при давлении до 0,5 МПа.

Для исследования защитных свойств противокоррозионных покрытий на образцах магнитов системы Nd–Fe–В проведены испытания на общую коррозионную стойкость в условиях ускоренных коррозионных испытаний в КСТ с непрерывным распылением 5 %-ного раствора хлористого натрия в течение 720 ч экспозиции.

Внешний вид магнитов системы Nd–Fe–В с противокоррозионными покрытиями до и после 720 ч испытаний в КСТ представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образцов магнитов системы Nd–Fe–В с противокоррозионными покрытиями до и после 720 ч испытаний в камере солевого тумана

По результатам испытаний установлено, что наиболее стойкими в условиях воздействия солевого тумана оказались гальванические покрытия системы H5M5H5O5 и кадмиевое покрытие, а среди ионно-плазменных – покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13.

Проведены исследования микроструктуры опытных образцов магнитов с выбранными защитными покрытиями после экспозиции в КСТ. Результаты исследований приведены на рис. 4.

Установлено, что высокая защитная способность исследуемых покрытий обусловлена прежде всего низкой пористостью предложенных систем покрытий. Средняя толщина покрытия системы СДП-1Т + ВСДП-13 составила 26,3 мкм, толщина покрытий

системы H5M5H5O5 находилась в пределах от 18,5 до 23 мкм, кадмиевое покрытие обеспечило защиту магнита системы Nd-Fe-B при толщине 9–12 мкм.

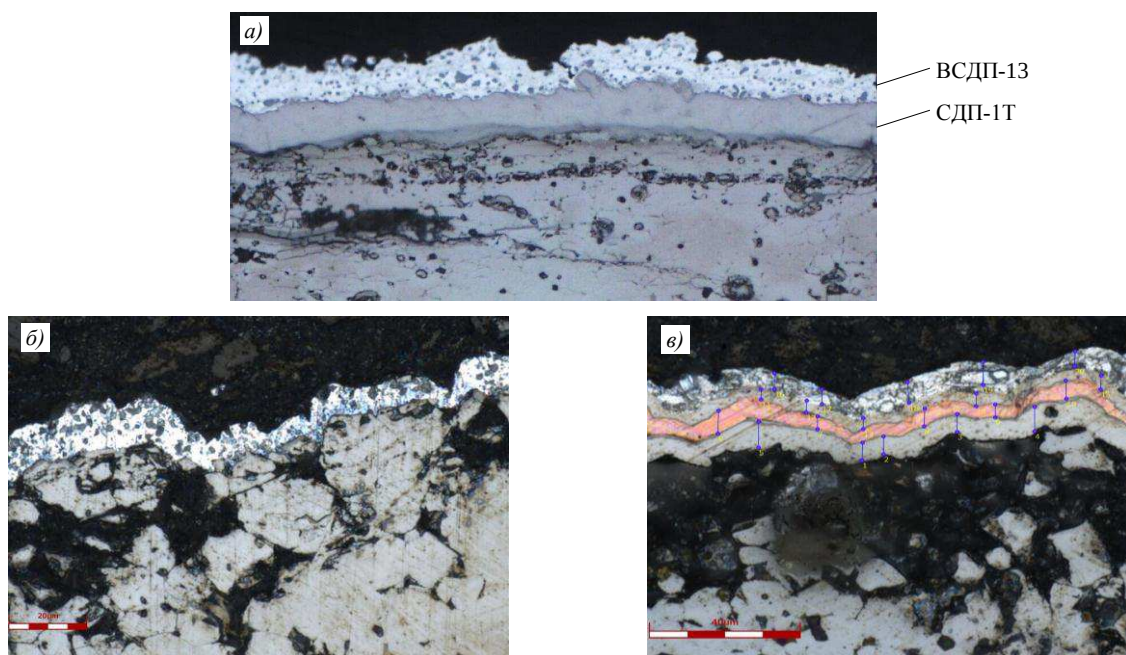


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) опытной партии образцов магнита системы Nd-Fe-B с противокоррозионными покрытиями после испытаний в камере солевого тумана в течение 720 ч: а – покрытие системы СДП-1Т + ВСДП-13; б – кадмиевое покрытие; в – гальваническое покрытие системы H5M5H5O5

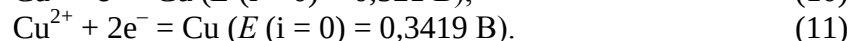
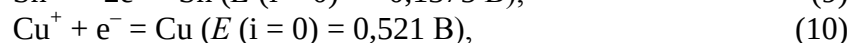
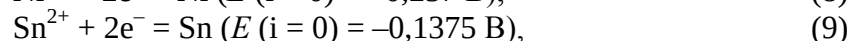
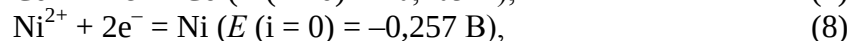
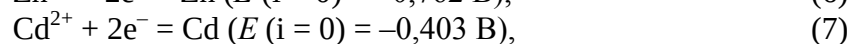
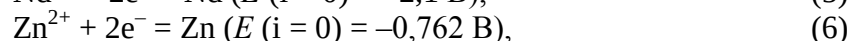
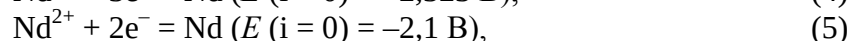
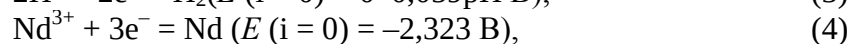
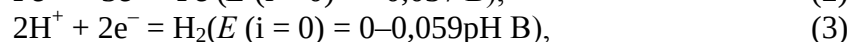
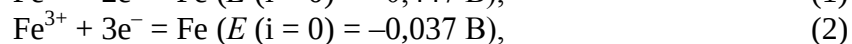
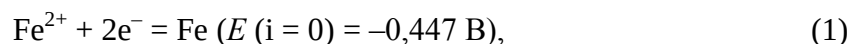
Для уточнения коррозионного поведения цинкового и кадмиевого покрытий и покрытия системы H5M5H5O5 проведено электрохимическое исследование путем измерения потенциала разомкнутой цепи ($E_{p.c}$) и методом линейной вольтамперометрии (ЛВ). В качестве объекта сравнения выбран магнит системы Nd-Fe-B без покрытия. Измерение $E_{p.c}$ проводили до и после регистрации кривых ЛВ. После помещения образцов с покрытиями в электролит значения $E_{p.c}$ (табл. 2) быстро достигали плато и принимали стационарное значение. После регистрации кривых ЛВ величина $E_{p.c}$ принимала значение, близкое к исходному, что может свидетельствовать об обратимости протекающих на поверхности процессов. При помещении в электролит образца системы Nd-Fe-B без покрытия наблюдалась иная картина. За время измерения (10 мин) значение $E_{p.c}$ плавно смещается в отрицательную область, не выходя на плато. Выхода на плато не наблюдалось и при измерении величины $E_{p.c}$ после регистрации кривых ЛВ. Подобное поведение может быть следствием коррозии образца без покрытия.

Таблица 2

Сводные данные электрохимических измерений образцов магнита системы Nd-Fe-B с различными покрытиями и без покрытия

Покрытие	$E_{p.c}$, В	E ($i = 0$), В	i_0 , мкА/см ²
Без покрытия	-0,58	-0,68	3,36
Zn	-0,79	-0,90	3,38
Cd	-0,53	-0,54	2,29
H5M5H5O5	-0,25	-0,24	0,29

После представления результатов ЛВ в полулогарифмических координатах (рис. 5) с помощью уравнения Тафеля получены основные электрохимические характеристики исследуемых систем: потенциал нулевого тока $E (i = 0)$, определяемый протекающими на поверхности электрода процессами, и плотность тока обмена i_0 , характеризующая скорость данных процессов. Анализ полученных результатов затрудняется тем, что величина $E (i = 0)$ является результатом суперпозиции нескольких разнонаправленных процессов. Так, в зависимости от материала покрытия на электроде могут протекать одна или несколько из следующих реакций:



В случае покрытий Zn и H5M5H5O5 потенциалопределяющими процессами, по-видимому, являются реакции (6) и (8) соответственно. Однако в случае Zn покрытия перезарядка электрода происходит на ~ 100 мВ при более отрицательных потенциалах. В случае образца магнита системы Nd–Fe–B без покрытий коррозионные процессы протекают при потенциалах более отрицательных нежели потенциал пары Fe(II)/Fe (реакция (1)), что объясняется присутствием в сплаве более активного металла (неодима). Похожая ситуация наблюдается на образцах с Cd покрытием, однако в данном случае присутствие более активного металла может быть следствием его диффузии из сплава.

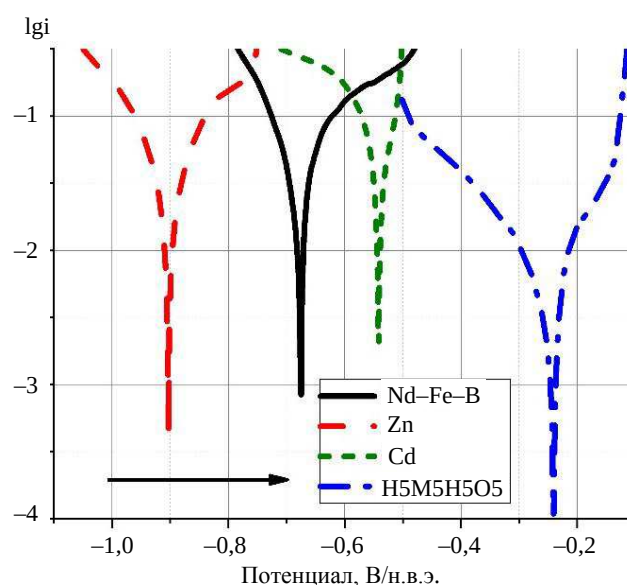


Рис. 5. Кривые, полученные с помощью уравнения Тафеля, для образцов системы Nd–Fe–B с покрытиями и без покрытия

Полученные данные свидетельствуют о том, что для обеспечения коррозионной устойчивости магнитов системы Nd–Fe–B наиболее подходящими являются покрытия на основе кадмия и системы H5M5H5O5. Из всех исследованных систем наименьшим значением i_0 обладали образцы с покрытием H5M5H5O5.

Исследовано влияние систем защитных покрытий на магнитные свойства постоянных магнитов системы Nd–Fe–B: остаточную индукцию B_r , коэрцитивную силу по намагниченности H_{cl} , максимальное энергетическое произведение $(BH)_{max}$, а также проведены замеры на образцах магнитов с покрытиями и без них.

На рис. 6 приведена кривая размагничивания магнитного материала, содержащего матричную фазу $Nd_2Fe_{14}B$, без покрытия.

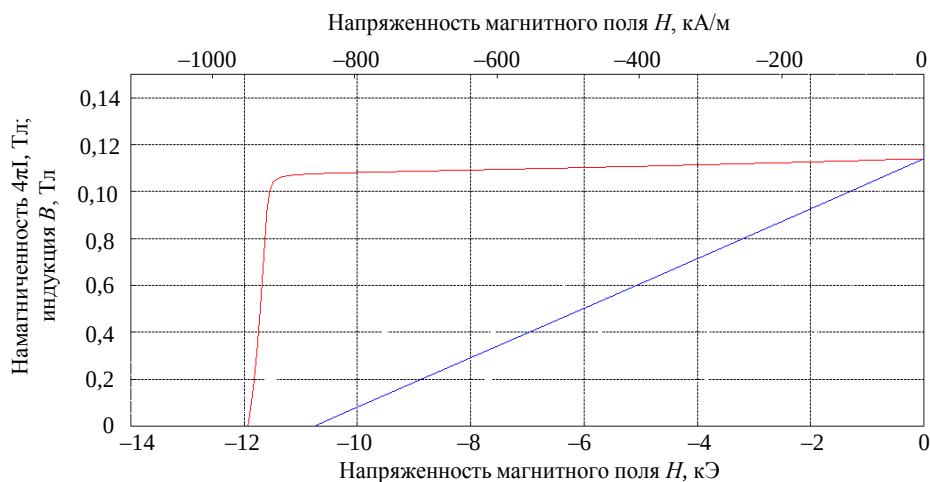


Рис. 6. Кривая размагничивания магнитного материала, содержащего матричную фазу $Nd_2Fe_{14}B$, без покрытия

Кривая размагничивания магнитного материала с кадмиевым покрытием представлена на рис. 7.

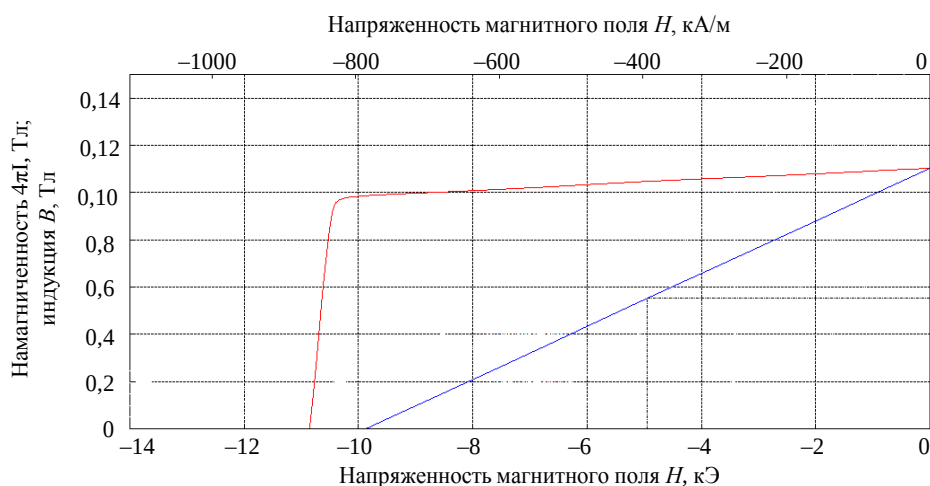


Рис. 7. Кривая размагничивания магнитного материала с кадмиевым покрытием

Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы H5M5H5O5 представлена на рис. 8.

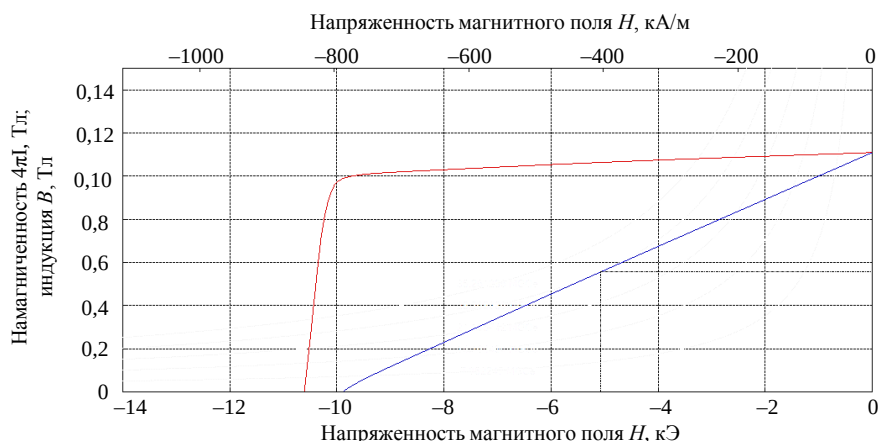


Рис. 8. Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы H5M5H5O5

Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием системы СДП-1Т + ВСДП-13 представлена на рис. 9.

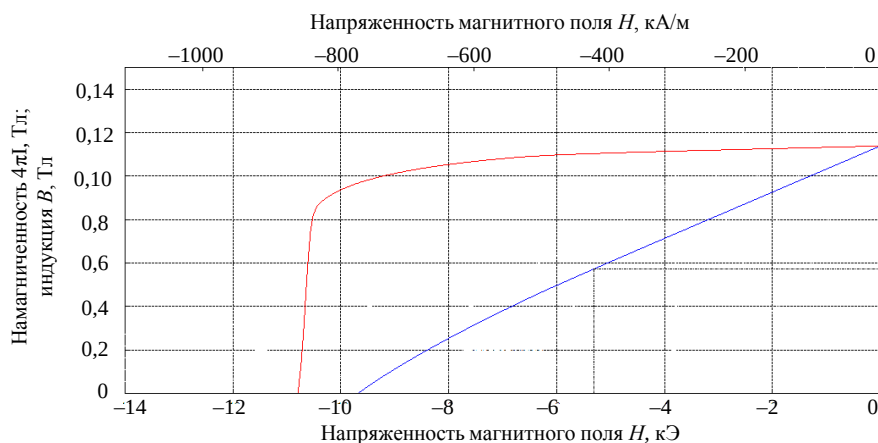


Рис. 9. Кривая размагничивания магнитного материала с покрытием СДП-1Т + ВСДП-13

В результате исследований установлено, что все выбранные варианты покрытий не снижают значений остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы по намагниченности H_{cl} , максимального энергетического произведения $(BH)_{max}$ на магнитах системы Nd-Fe-B.

Заключения

В рамках исследований предложен способ активации поверхности магнитных материалов системы Nd-Fe-B методом обработки в растворах фторидов, позволяющий наносить широкий спектр защитных гальванических покрытий без растрыва поверхности.

Электрохимическое исследование путем измерения потенциала разомкнутой цепи $E_{р.ц}$ и методом линейной вольтамперометрии показали, что наиболее эффективными покрытиями для магнитных материалов системы Nd-Fe-B являются покрытия, обеспечивающие материалу анодную защиту – в частности, покрытия на основе цинка, однако при этом отмечается высокая скорость коррозионных процессов.

Проведено исследование защитных свойств противокоррозионных покрытий в условиях ускоренных коррозионных испытаний в КСТ, по результатам которых выбраны: покрытие системы H5M5H5O5 и кадмиевое покрытие, полученные

гальваническим методом, а также покрытие СДП-1Т + ВСДП-13, полученное вакуумно-дуговым способом, которые обеспечивают минимальную пористость при толщине покрытий не более 25 мкм.

Исследовано влияние систем защитных покрытий на магнитные свойства постоянных магнитов. Показано, что все выбранные варианты покрытий не снижают эксплуатационных свойств постоянных магнитов: коэрцитивной силы, остаточной индукции и максимального энергетического произведения.

Список источников

1. Пуцыкин Г.Г., Пашков П.П., Вейциль М.Я. Исследование теплофизических условий получения и структуры кристаллически анизотропных постоянных магнитов // Физика металлов и металловедение. 1963. Т. 15. Вып. 4. С. 118–123.
2. Савченко А.Г. Магниты Nd–Fe–B и перспективные технологии их производства // Сб. материалов семинара «Научно-технологическое обеспечение деятельности предприятий, институтов и фирм» (МИСиС, 1 июля 2003 г.). М.: МГИУ, 2003. С. 510–546.
3. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
4. Королев Д.В., Столянков Ю.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бахметьев М.В., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Магнитные свойства и полосовые домены в микрополосках PrDyFeCoB // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
5. Коновалов В.В., Дубинский С.В., Макаров А.Д., Доценко А.М. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
6. Бондаренко Ю.А. Тенденции развития высокотемпературных металлических материалов и технологий при создании современных авиационных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-3-11.
7. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. 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.
9. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // Металлы Евразии. 2010. № 2. С. 6–11.
10. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
11. 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 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
12. Лобынцев Е.С., Глушко И.М., Кузнецов В.М. Получение магнитов со столбчатой структурой методом литья в сотовые формы // Электротехническая промышленность. Электротехнические стали. 1974. Вып. 9 (38). С. 15–19.
13. Лившиц Б.Г., Еникеев Г.Х., Блатов В.Г. Получение магнитов высоких энергий из сплава ЮНДК35Т5БА в промышленных условиях // IV Всесоюз. конф. по постоянным магнитам. Новочеркасск: АН СССР, 1971. С. 38.
14. Скларов А.Е., Чабан И.П., Гриднев А.И., Власов В.Г. Получение монокристаллов сплавов для постоянных магнитов в промышленных условиях // Выращивание тугоплавких редких металлов. М.: Наука, 1973. С. 8–11.

15. Пикунов М.В., Беляев И.В., Сидоров Е.В. Кристаллизация сплавов и направленное затвердевание отливок. Владимир: Владимирск. гос. ун-т, 2002. 213 с.
16. Пискорский В.П. Термостабильные магнитотвердые материалы на основе редкоземельных интерметаллидов с тетрагональной структурой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИАМ, 2014. 36 с.
17. Ayres R.U., Peiró L.T. Material efficiency: Rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2013. Vol. 371 (1986). P. 20110563. DOI: 10.1098/rsta.2011.0563.
18. Nakamura H., Hirota K., Shima M. et al. Magnetic properties of extremely small Nd-Fe-B sintered magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2005. Vol. 41. No. 10. P. 3844–3846.
19. Schultz L., El-Aziz A.M., Barkleit G., Mummert K. Corrosion behaviour of Nd-Fe-B permanent magnetic alloys // *Materials Science and Engineering A*. 1999. Vol. 267. No. 2. P. 307–313.
20. Ishii R., Miyoshi T., Kanekiyo H., Hirotsawa S. High-coercivity nanocomposite permanent magnet based on Nd-Fe-B-Ti-C with Cr addition for high-temperature applications // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. Vol. 312. No. 2. P. 410–413.
21. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989. С. 496–497.
22. Довгалецкий Я.М. Литые магниты из сплавов Магнито. М.: Машиностроение, 1964. С. 151–152.

References

1. Putsykin G.G., Pashkov P.P., Vejtsel M.Ya. Investigation of the thermophysical conditions for obtaining and the structure of crystalline anisotropic permanent magnets. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1963, vol. 15, is. 4, pp. 118–123.
2. Savchenko A.G. Nd-Fe-B magnets and promising technologies for their production. Materials of the seminar "Scientific and technological support for the activities of enterprises, institutions and firms". Moscow: MGIU, 2003, pp. 510–546.
3. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. The thermal stability of rare-earth magnets supported by means of the magnetocaloric effect. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
4. Korolev D.V., Stolyankov Yu.V., Piskorsky V.P., Valeev R.A., Bahmetiev M.V., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Magnetic properties and magnetic strip domains in micro stripes PrDyFeCoB. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 03, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-86-93.
5. Konovalov V.V., Dubinskiy S.V., Makarov A.D., Dotsenko A.M. Research of correlation dependencies between mechanical properties of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
6. Bondarenko Yu.A. Trends in the development of high-temperature metal materials and technologies in the production of modern aircraft gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 3–11. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2019-0-2-3-11.
7. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
8. 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.
9. Kablov E.N. Innovative development is the most important priority of the state. *Metaliy Eurazii*, 2010, no. 2, pp. 6–11.
10. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.

11. 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.
12. Lobyntsev E.S., Glushko I.M., Kuznetsov V.M. Obtaining magnets with a columnar structure by casting into honeycomb molds. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Elektrotekhnicheskkiye stali*, 1974, is. 9 (38), pp. 15–19.
13. Livshits B.G., Enikeev G.Kh., Blatov V.G. Production of high-energy magnets from YUNDK35T5BA alloy under industrial conditions. IV All-Union. conf. by permanent magnets. Novocherkassk: AN SSSR, 1971, p. 38.
14. Sklyarov A.E., Chaban I.P., Gridnev A.I., Vlasov V.G. Obtaining single crystals of alloys for permanent magnets in industrial conditions. *Growing refractory rare metals*. Moscow: Nauka, 1973, pp. 8–11.
15. Pikunov M.V., Belyaev I.V., Sidorov E.V. Crystallization of alloys and directional solidification of castings. Vladimir: Vladimir State University, 2002, 213 p.
16. Piskorsky V.P. Thermostable hard magnetic materials based on rare-earth intermetallic compounds with a tetragonal structure: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2014, 36 p.
17. Ayres R.U., Peiro L.T. Material efficiency: Rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2013, vol. 371 (1986), p. 20110563. DOI: 10.1098/rsta.2011.0563.
18. Nakamura H., Hirota K., Shima M. et al. Magnetic properties of extremely small Nd–Fe–B sintered magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, vol. 41, no. 10, pp. 3844–3846.
19. Schultz L., El-Aziz A.M., Barkleit G., Mummert K. Corrosion behavior of Nd–Fe–B permanent magnetic alloys. *Materials Science and Engineering A*, 1999, vol. 267, no. 2, pp. 307–313.
20. Ishii R., Miyoshi T., Kanekiyo H., Hirose S. High-coercivity nanocomposite permanent magnet based on Nd–Fe–B–Ti–C with Cr addition for high-temperature applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, vol. 312, no. 2, pp. 410–413.
21. Kekalo I.B., Samarin B.A. Physical metallurgy of precision alloys. Alloys with special magnetic properties. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 496–497.
22. Dovgalevsky Ya.M. Cast magnets from Magnico alloys. Moscow: Mashinostroenie, 1964, pp. 151–152.

Информация об авторах

Демин Семен Анатольевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Заварзин Семен Витальевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чередниченко Игорь Валерьевич, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлов Илья Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Igor V. Cherednichenko, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.04.2022.
The article was submitted 04.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 07.04.2022.

Научная статья

УДК 620.193+620.197

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-108-126

90-ЛЕТНЯЯ ПРАКТИКА ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ

В.В. Антипов¹, В.А. Дуюнова¹, М.С. Оглодков¹,
М.А. Фомина¹, Т.П. Французова¹, И.А. Козлов¹

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

Аннотация. Изложены результаты практических исследований коррозионной стойкости металлических материалов, используемых в конструкциях отечественной авиационной техники, за многолетний период. В работе соблюдена хронология исследований и разработок противокоррозионной защиты. Изложены проблемные вопросы в части климатической и биологической стойкости материалов. Приведены типовые коррозионные разрушения металлических материалов из-за коррозионного растрескивания, применения технических жидкостей и топлив, а также контакта разнородных материалов. Представлены технологические решения по противокоррозионной защите, принятые на разных этапах ее развития, которые являются актуальными и в настоящее время.

Ключевые слова: авиационная техника, воздушные суда, коррозия, защитные покрытия, антикоррозионная защита, конструкционные материалы

Для цитирования: Антипов В.В., Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Фомина М.А., Французова Т.П., Козлов И.А. 90-летняя практика противокоррозионной защиты // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-108-126.

Scientific article

90-YEAR PRACTICE OF ANTICORROSIVE PROTECTION

V.V. Antipov¹, V.A. Duyunova¹, M.S. Oglochkov¹,
M.A. Fomina¹, T.P. Frantsuzova¹, I.A. Kozlov¹

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

Abstract. Results of practical researches of corrosion resistance of the metal materials used in designs of domestic aviation engineering, for the long-term period are stated. In work the chronology of researches and development of anticorrosive protection is observed. Problem questions regarding climatic and biological firmness of materials are stated. Standard corrosion destructions of metal materials because of corrosion cracking, application of technical liquids and fuels, and also contact of diverse materials are given. Technological decisions on the anticorrosive protection, its developments accepted at different stages which are actual and now are provided.

Keywords: aviation equipment, aircraft, corrosion, protective coatings, anti-corrosion protection, structural materials

For citation: Antipov V.V., Duyunova V.A., Oglochkov M.S., Fomina M.A., Frantsuzova T.P., Kozlov I.A. 90-year practice of anticorrosive protection. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-108-126.

Введение

Вопрос защиты металлических материалов от коррозии, как и век назад, является актуальным и в настоящее время. Страны по всему миру ежегодно несут огромные экономические потери вследствие воздействия коррозии. По разным подсчетам от 1 до 5 % валового внутреннего продукта приходится на ущерб от коррозионных разрушений. В Китае потери от воздействия коррозии составляют 3,3 % от ВВП, в США – 3,1 %, в Великобритании – 3,5 %, в Германии – 2,8 %, в Японии – 1 %. В России подобная статистика не ведется, но по опыту других стран становится понятно, что экономические потери в нашей стране составляют от 1,3 до 6,5 трлн руб. в год.

В авиационной технике, особенно гражданского назначения, особое внимание уделяется противокоррозионной защите и ресурсу металлических конструкций. Во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (далее – ВИАМ) на протяжении уже 90 лет ведется борьба с коррозией. На данный момент это ведущий материаловедческий центр Российской Федерации.

В настоящее время вклад ВИАМ в решение указанной проблемы невозможно представить без исследований выдающегося ученого, доктора технических наук, профессора, основателя отечественной школы коррозии металлов и сплавов Георгия Владимировича Акимова. Еще в далеком 1928 г. он организовал и возглавил на тот момент единственную коррозионную лабораторию в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ). Долгое время эта лаборатория оставалась единственной лабораторией подобного профиля в стране. В 1932 г. она в составе отдела испытания авиационных материалов была преобразована во Всесоюзный научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ). В настоящее время сотрудники лаборатории занимаются исследованием влияния климатических факторов и агрессивных сред на свойства материалов, разрабатывают системы противокоррозионной защиты полуфабрикатов, деталей и изделий авиационной техники при эксплуатации и хранении.

Во всем мире большое внимание уделяется климатическим испытаниям в естественных условиях, постоянно расширяется география представительных пунктов для проведения экспозиции перспективных и типовых материалов. В нашей стране при участии Георгия Владимировича Акимова были созданы коррозионные станции в различных климатических зонах. Сотрудники ВИАМ продолжили дело ученого, и в 2009 г. в эксплуатацию был введен Геленджикский центр климатических испытаний (ГЦКИ), которому позднее присвоили имя Г.В. Акимова. В ГЦКИ на современном оборудовании проводят исследования старения, биоповреждений и коррозионной стойкости самых разных материалов в атмосфере и морской воде [1]. Все испытания осуществляются по современной методологии и соответствуют стандартам: ГОСТ, ISO и ASTM.

Несмотря на то, что основы системы борьбы с коррозией были заложены еще в прошлом веке, в настоящее время исследователи коррозионных процессов сталкиваются с новыми вызовами, которые нуждаются в решении.

Практика противокоррозионной защиты

Начиная с основания ВИАМ и по настоящее время, в институте изучают причины возникновения коррозионных процессов, разрабатывают защитные покрытия и рекомендации по предотвращению коррозии не только летательных аппаратов, но и других изделий и конструкций [2–4].

В начале деятельности института, в 1930-х гг., исследовались повреждения деревянных частей самолетов, покрытых тканью и специальными лакокрасочными покрытиями (ЛКП). Например, изучались повреждения многоцелевого одномоторного самолета и одномоторного истребителя-моноплана, созданного в Опытно-конструкторском бюро

(ОКБ) Н.Н. Поликарпова (рис. 1), а также десантного планера конструкции П.В. Цыбина и советского штурмовика времен Второй мировой войны, созданного в ОКБ-240 под руководством С.В. Ильюшина [5, 6].



Рис. 1. Микологические повреждения центроплана крыла многоцелевого одномоторного самолета, созданного в ОКБ Н.Н. Поликарпова

Сотрудники ВИАМ выявили причину микологических повреждений, возникших в результате двухлетней эксплуатации летательных аппаратов. Местное увлажнение, недостаточная грибоустойчивость древесных материалов, а также использование клеев белкового происхождения привели к появлению грибка и трещин на крыльях летательных аппаратов. В качестве мер по предотвращению дальнейших коррозионных разрушений предложено антисептировать материалы и дренировать конструкции. Для советской летающей лодки, разработанной в Центральном конструкторском бюро морского самолетостроения под руководством Г.М. Бериева, помимо перечисленных мер защиты, разработан новый способ защиты днища лодки с использованием ткани на клею ВИАМ-БЗ [1]. Предложено в местах контакта днища с водой наносить дополнительный слой с глифталевым покрытием.

Коррозионные исследования проводили также для высотного истребителя, разработанного в ОКБ А.И. Микояна (рис. 2). Причиной меления и растрескивания ЛКП на деревянных обшивках оказались старение покрытий при длительном воздействии солнечных лучей и недостаточная атмосферостойкость применяемой для обшивки альбуминовой фанеры. Для решения возникшей проблемы провели профилактический ремонт ЛКП и применили бакелитовую атмосферостойкую фанеру, а также специальные чехлы для крыльев, защищающие поверхность от увлажнения, обледенения и воздействия солнечных лучей в периоды стоянки [7].

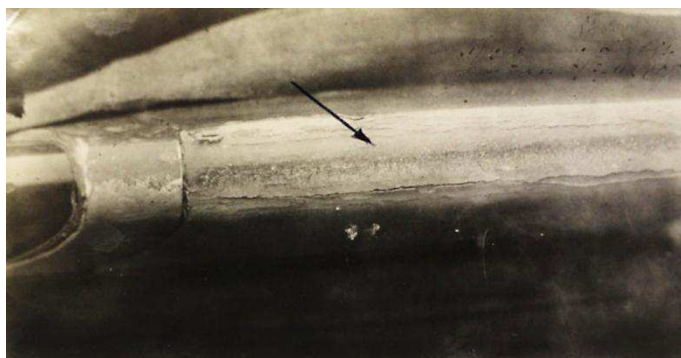


Рис. 2. Трещины лакокрасочного покрытия на законцовке крыла высотного истребителя, созданного в ОКБ А.И. Микояна

Впервые было установлено и негативное влияние графита на металлические материалы пассажирского самолета, разработанного в ОКБ С.В. Ильюшина. Многомесячные стоянки без должного ухода в атмосфере, загрязненной промышленными газами, контакт с графитированным асбестом и воздействие воды с примесью тетраэтила свинца привели к поражениям обшивок крыла, труб и внутренней поверхности днища бензобака [8], а воздействие продуктов сгорания этилированного топлива – к развитию межкристаллитной и расслаивающей коррозии стыковых угольников крыла (рис. 3).

В ВИАМ коррозионные исследования проходили немало самолетов производства ОКБ А.Н. Туполева. Так, в послевоенные годы сотрудники института исследовали коррозию деталей поршневого советского стратегического бомбардировщика. Ряд деталей подвергся коррозионному растрескиванию (рис. 4) за 4–5 лет эксплуатации из-за длительного действия нерасчетных нагрузок и коррозионной среды [9, 10].

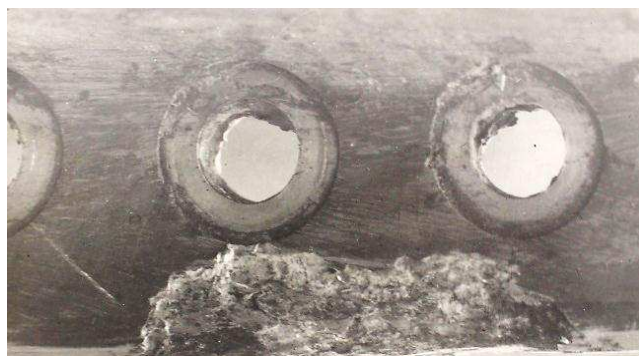


Рис. 3. Коррозия стыкового угольника центроплана крыла самолета, разработанного в ОКБ С.В. Ильюшина

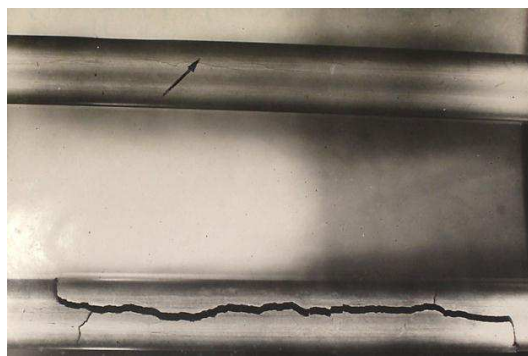


Рис. 4. Коррозионное растрескивание анодированных труб трансмиссии вала закрылка стратегического бомбардировщика, созданного в ОКБ А.Н. Туполева

Для предотвращения подобных разрушений предложено систематически контролировать регулировку вала трансмиссии и усилить защиту от коррозии. У ряда машин, созданных в ОКБ А.Н. Туполева, наблюдались похожие повреждения внешней и нижней обшивок крыла [8]. Причиной этого стала недостаточная защита поверхности. Работники ВИАМ предложили использовать для усиления защиты систему ЛКП, содержащую грунт и эмаль.

При изучении коррозионных повреждений первого советского пассажирского самолета на реактивной тяге, разработанного в ОКБ А.Н. Туполева, выявлен ряд зон, в которых в процессе эксплуатации созданы условия для возникновения и интенсивного развития коррозии. Появление таких зон в основном связано с недостатками конструктивного исполнения и вследствие этого недопустимого воздействия коррозионно-активных сред на используемые системы антикоррозионной защиты. Наиболее подверженными коррозии участками конструкции данного самолета являются: поперечный и продольный наборы фюзеляжа под полами (стрингеры, компенсаторы, шпангоуты и т. д.); наружная и внутренняя поверхности обшивки фюзеляжа, особенно в зонах санузла, аккумуляторных батарей и выхлопа; магниевые каркасы фонаря кабины штурмана; стальные каркасы фонаря кабины пилотов; обшивка рулей высоты; ниша аккумуляторов и т. д. Так, например, одним из видов поражений стала коррозия деталей под полом гермокабины и санузла из-за скопления воды с примесью коррозионно-активных веществ. В доработанной версии советского пассажирского самолета с увеличенным количеством пассажиромест и более мощными двигателями также возникали подобные случаи коррозии. Из-за повреждения защитных покрытий и недостатка смазки корродировали кронштейн багажного люка (рис. 5) и каркас фонаря кабины штурмана из сплава МЛ5-Т4, предварительно оксидированного и покрытого ЛКП, а также обшивка фюзеляжа из анодированного и покрытого грунтом сплава Д16-АТВ [9, 10].

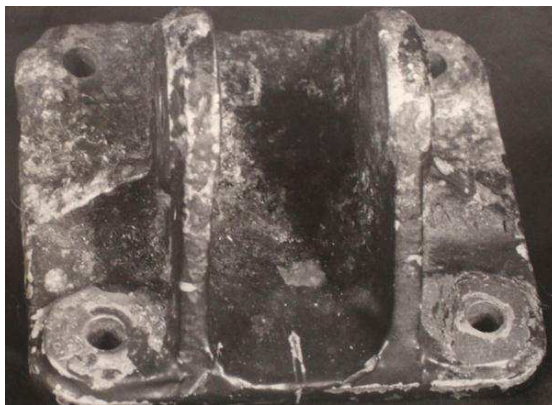


Рис. 5. Коррозия кронштейна багажного люка самолета, созданного в ОКБ А.Н. Туполева, из сплава МЛ5-Т4, оксидированного и защищенного лакокрасочным покрытием

В ходе исследований другого самолета гражданской авиации, созданного в ОКБ А.Н. Туполева, позднее было установлено, что на отдельных деталях и элементах конструкции уже при 200-часовой эксплуатации возникают коррозионные повреждения. Коррозию обнаруживали на отдельных заклепках посадочных щитков, зализов и створок шасси, выступающих головках винтов, болтов, верхней поверхности стабилизатора, рулей высоты и т. д. На всех перечисленных участках коррозия носила поверхностный характер, ее отмечали в местах механического разрушения защитных покрытий или недостаточной смазки. В качестве рекомендаций предложено провести возможные конструктивные усовершенствования планера самолета для исключения факторов, вызывающих коррозию его элементов. Для устранения возможности попадания воды из раковины буфета в салон самолета и подпольное пространство необходимо доработать сливное устройство, а для устранения возможности попадания агрессивных жидкостей из санузла и водозаправочного бака в подполье и на пол туалетных комнат предложено улучшить герметизацию зоны санузла, клапанных устройств, сливных и заправочных кранов.

В ВИАМ также исследовали случаи коррозионных поражений на трехдвигательном реактивном пассажирском авиалайнере. За время его эксплуатации коррозии подвергались хвостовая часть фюзеляжа ниже пола у санузла, обшивка центральной части крыла под обтекателем, вал трансмиссии (рис. 6), сотовые клееные панели и другие детали [8]. Основные причины коррозии – длительное воздействие коррозионно-активных сред (чаще всего воды) на детали и недостаточная защита последних. Устранение взаимодействия с жидкостями, усиление защиты и замена одних материалов на другие позволили решить возникающие в процессе эксплуатации проблемы [11, 12].

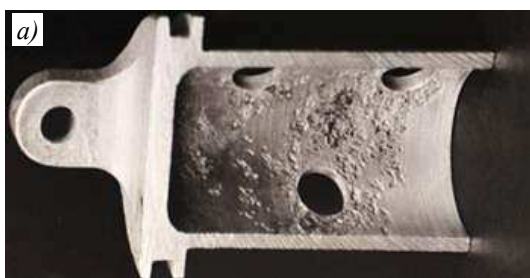


Рис. 6. Коррозия вала трансмиссии закрылков гражданского пассажирского самолета, разработанного в ОКБ А.Н. Туполева: наконечника (а) и трубы (б) из вороненой и загрунтованной стали 30ХГСА

Специалисты ВИАМ проводили эксплуатационные исследования и различных самолетов, изготавливаемых в ОКБ «Антонов» [13–17]. Так, исследование военно-

транспортного самолета выявило, что скопление влаги на потолке негерметичного отсека и внутри штепсельного разъема стало причиной коррозии каркаса и обшивки потолка, кронштейна узла управления на потолке и штырей штепсельного разъема систем управления воздушным винтом (рис. 7).

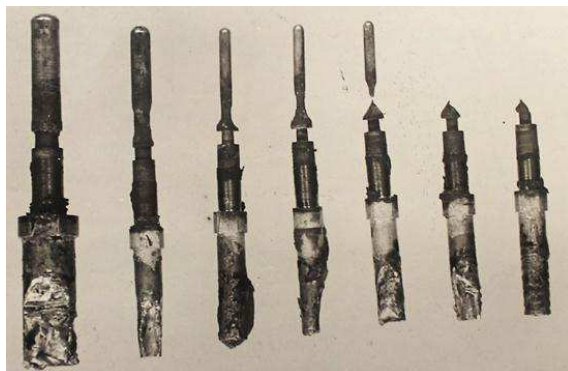


Рис. 7. Коррозия под током штырей штепсельного разъема системы управления воздушным винтом самолета, разработанного в ОКБ «Антонов»

После трехлетней эксплуатации на турбовинтовом самолете наблюдали отслоения клеевых валиков, клея и коррозию обшивки и сварных точек на стрингере. Сотрудники ВИАМ выяснили, что причинами появления подобных дефектов стали скопление воды под полом гермокабины, а также непрочности и пористость в слое клея ФЛ-4С. Помимо рекомендации об исключении скоплений воды предложено применять сварку по клею ВК-1МС вместо ранее используемого клея ФЛ-4С. Несоответствие характеристик защитных покрытий жестким требованиям эксплуатации в условиях побережья Индийского океана и длительные перерывы между полетами привели к коррозии панели центроплана крыла и лопастей воздушного винта [18]. Применение защитных покрытий, предназначенных для изделий, эксплуатируемых в морских условиях, позволило продлить работоспособность деталей другого изделия, изготавливаемого в ОКБ «Антонов» [1]. По результатам исследований также разработана технология обслуживания, в которую входили технологии восстановления ЛКП, подготовка лакокрасочных материалов, удаление старого покрытия и обнаружение коррозионных поражений. Кроме того, в технологии обслуживания описаны различные неразрушающие методы контроля, позволяющие обнаружить повреждения конструкции, которые сложно распознать при визуальном осмотре [13, 19].

На тяжелом турбовинтовом транспортном самолете, разработанном в ОКБ «Антонов», после шести лет эксплуатации выявлено повреждение клеесварной панели стабилизатора. На панели отслаивались валики клея (рис. 8), а на внешней поверхности нижней панели были видны сквозные коррозионные повреждения сварных точек. Сотрудники ВИАМ объяснили данное явление отсутствием защиты металла в клеесварном соединении. В качестве рекомендаций предложено ограничить применение клеесварных соединений в конструкциях, которые подвергаются воздействию коррозионно-активных сред и значительных вибраций. Вместо заливки клея К-4С в зазоры точечных сварных соединений также предложено применять сварку по клею ВК-1МС и исключить из технологии операцию образования клеевых валиков.

Воздушные судна, созданные в ОКБ С.В. Ильюшина, также проходили исследования, направленные на обнаружение и предотвращение коррозии [20]. В ходе таких испытаний на ряде самолетов наблюдали точечную коррозию наружной поверхности полированной обшивки в районе санузлов. Коррозии подвергались также обшивка с внутренней стороны, стрингер в грузовых отсеках и в районе шпангоутов. Отдельные поражения отмечены на стальных деталях самолетов, узлах стыка шасси, креплениях

лючков по нижней панели крыла, качалке укрепления тяги руля поворота и т. д. Коррозия на всех осмотренных деталях носила поверхностный характер и возникла в зонах механических повреждений защитных покрытий или некачественной смазки [18]. В качестве рекомендаций предложено ускорить внедрение неразрушающих методов контроля коррозионного состояния обшивки и стрингера в подпольном пространстве фюзеляжа на ремонтных и эксплуатирующих предприятиях, ввести контроль коррозионного состояния нижней панели кессон-бака, обшивки в зоне крепления системы кондиционирования воздуха, наружных поверхностей прессованных панелей. Кроме того, при обнаружении повреждений предложена технология восстановления покрытий.



Рис. 8. Панель стабилизатора самолета, разработанного в ОКБ «Антонов», с отслоившимися валиками клея

У пассажирского турбовинтового лайнера, созданного в ОКБ С.В. Ильюшина, также возникали проблемы с коррозией. Наиболее часто были подвержены коррозии следующие зоны конструкции самолета: внутренняя поверхность обшивки в подпольной части фюзеляжа; стрингеры, компенсаторы, шпангоуты в подпольной части фюзеляжа и в районе установки санузла; стенка, лучи на задней герметичной стенке; детали управления – качалки, кронштейны; наружная поверхность обшивки стабилизатора, рулей высоты и поворота, киля, элеронов; направляющие тяг рулей поворота и высоты; каркас запасного выхода и т. д. Помимо этого, в нескольких случаях еще до сдачи в эксплуатацию некоторые самолеты данного типа с незавершенной защитой ЛКП после четырехмесячной стоянки на заводском аэродроме подвергались коррозии из-за отсутствия должного ухода. Другой пример: после 17 лет эксплуатации лайнера в Азербайджанском управлении гражданской авиации вследствие жестких условий работы и отсутствия своевременного ремонта продукты коррозии наблюдали на лонжеронах центроплана и стабилизатора.

На советском тяжелом военно-транспортном самолете разработки ОКБ С.В. Ильюшина после шестилетней эксплуатации стали образовываться трещины обшивки около заклепок в результате концентрации напряжений, также наблюдалось самоотвинчивание винтов крепления стенки рельса закрылка из-за недостаточной прочности соединения. В качестве решения проблемы предложено применять комбинированное клееклепаное соединение. Коррозионные поражения наблюдали и в хвостовой панели крыла, а именно в сотовом заполнителе [8, 18]. В ходе исследования выяснили, что причина коррозии сотового заполнителя заключается в недостаточной точности изготовления деталей каркаса сотовых панелей, а также в механических повреждениях защитных покрытий на узлах из сплава МЛ5-Т4 (рис. 9). Повышение точности изготовления деталей и исключение механических повреждений позволили снизить скорость коррозионного процесса. Спустя два года эксплуатации наблюдали также повреждения сотовой клееной секции тормозного щитка. Причиной повреждений оказался местный

непроклей секции. В качестве решения предложено усилить контроль технологии склеивания, а также применять соты с ячейками размером 2,5 мм [21, 22].



Рис. 9. Коррозия литого узла из-под пола фюзеляжа из сплава МЛ5-Т4 тяжелого военно-транспортного самолета, разработанный в ОКБ С.В. Ильюшина

Аналогичные повреждения сотовой клееной секции наблюдали и после трехлетней эксплуатации четырехдвигательного широкофюзеляжного пассажирского самолета разработки ОКБ С.В. Ильюшина [21]. Однако здесь причина заключалась не только в непрочности (рис. 10), но и в разрушении осевого болта узла навески секции щитка, пораженного коррозией. Таким образом, можно сделать вывод, что в основном коррозии подвергались наружные поверхности прессованных панелей фюзеляжа и крыла самолетов из сплава Д16-Т в местах стыка панелей и отверстий под крепеж, зализ фюзеляжа, внутренняя поверхность прессованных панелей воздушного отсека кессона, а также законцовочные части крыла, головки фрезерованных заклепок и внешняя поверхность неокрашенных трубопроводов. Для защиты от коррозии разработан целый ряд мероприятий по предотвращению разрушений, включающий анодное оксидирование деталей из сплава Д16-Т, нанесение слоя грунтовки марок АК-0209 и ВЛ-02 по заклепкам, герметизация щелей и зазоров внешней поверхности планера с применением герметика ВИТЭФ-1 и др. [9, 10].

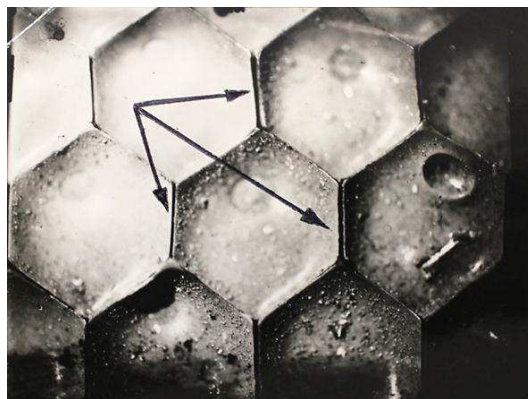


Рис. 10. Местный непрочность сотовой клееной хвостового звена закрылка тяжелого военно-транспортного самолета, разработанный в ОКБ С.В. Ильюшина

Случаи коррозии на машинах, созданных в ОКБ С.А. Лавочкина, также изучались специалистами ВИАМ. Так, например, после годовой эксплуатации в изделиях наблюдали нарушения ЛКП на аэродинамическом ребре крыла, торцах обшивки фюзеляжа (рис. 11) и носке крыла самолета, а также коррозию законцовки крыла и головок

стальных заклепок [8]. В ходе исследований выявлено, что причиной подобных поражений стало воздействие спиртоглицериновой смеси, частиц песка и хлорида натрия, содержащихся в аэродромном грунте на взлетной и рулежных полосах. Своевременное восстановление ЛКП и исключение воздействия спиртоглицериновой смеси позволили продлить срок службы изделия.



Рис. 11. Коррозия съемной панели фюзеляжа из сплава МА1 самолета, разработанного в ОКБ С.А. Лавочкина, расположенной под расходными керосиновым и спиртоглицериновым баками

Среди летательных аппаратов, которые прошли эксплуатационные испытания в ВИАМ, можно найти и гидросамолеты, изготовленные на ПАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева» (ТАНТК им. Г.М. Бериева). Одними из характерных повреждений изделия после двухлетней эксплуатации на Черном море были меление перхлорвиниловой эмали на носовой части лодки и закрылке правой консоли крыла, а также повреждения ЛКП при вытекании тиокола из заклепочного шва и при деформации днища лодки (рис. 12). Причинами данных повреждений являются длительное воздействие солнечных лучей, низкая термостойкость тиокола и большая деформация днища. В качестве решения проблем предложено своевременно проводить профилактический ремонт ЛКП, заменить тиокол на герметик У30М и сделать днище более жестким – в частности, путем применения клееклепаного соединения. Основным же поражающим фактором стала морская вода, в результате воздействия которой на обшивке лодки в контакте с накладкой через асбест, нижней поверхности крыла в зоне посадочной фарты, щеткодержателях генератора, металлизационной перемычке, экранировке электропроводов из медной луженой проволоки, трубках гидравлической системы кормовой установки и других деталях наблюдались коррозионные повреждения [1].



Рис. 12. Коррозия днища лодки гидросамолета, созданного на ТАНТК им. Г.М. Бериева, после стоянки в акватории Баренцева моря

Помимо этого, проводили исследования состояния лодки разработки ТАНТК им. Г.М. Бериева после трехлетней эксплуатации на Черном море. Выявлены коррозионные повреждения обшивки из сплава Д16-АТВ в контакте с узлом из стали 12Х18Н9Т через ЛКП и тиокол, кронштейна из сплава АК8 в контакте с подшипником из стали Х18 через грунт (рис. 13), трубки из сплава АМгб в месте зачистки ЛКП под металлизацию. Причина разрушений – недопустимые контакты алюминиевых сплавов с нержавеющей сталью и медью. Другими недостатками являются деформация днища и нарушение ЛКП на этом же месте из-за недостаточной его жесткости.

Многие воздушные суда, созданные в ОКБ А.С. Яковлева, также проходили коррозионные исследования в ВИАМ [23]. Так, случаи коррозии были зафиксированы на двухместных истребителях-перехватчиках. После двух лет эксплуатации и еще трех лет стоянки на нижней обшивке крыла (рис. 14) самолета наблюдали точечную коррозию, не выходящую за пределы плакировки сплава Д16-АВТ [8]. Выяснили, что причина кроется в длительной стоянке вне ангара без чехлов, недостаточном уходе и отсутствии дополнительного защитного слоя в виде ЛКП.



Рис. 13. Коррозия кронштейна из сплава АК8 в контакте с подшипниками из стали Х18 (через грунт) гидросамолета, разработанного на ТАНТК им. Г.М. Бериева

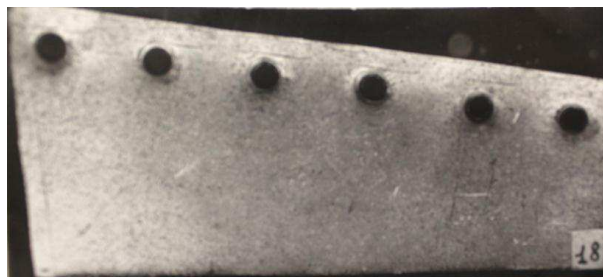


Рис. 14. Коррозия нижней обшивки из сплава Д16-АВТ закрылка самолета, созданного в ОКБ А.С. Яковлева

После восьмилетней эксплуатации турбореактивного пассажирского самолета разработки ОКБ А.С. Яковлева перед сотрудниками ВИАМ была поставлена задача – найти причины возникших коррозионных поражений. Так, причинами коррозии лонжерона центроплана из неанодированного сплава Д16-АВТ стали местное удаление анодной пленки при сборке и жесткие условия эксплуатации [9, 10]. Другая проблема – недостатки клеесварных и теплозвукоизоляционных панелей фюзеляжа, а именно непрочности в соединении стрингера с обшивкой, вода над потолком и под полом гермокабины, провисание теплозвукоизоляционных (потолочных) панелей вследствие накопления в них воды. Причинами повреждений являлись несовершенство способа заливки клея в зазоры точечного сварного соединения и недостаточная эффективность слоя теплозвукоизоляции. В качестве рекомендаций предложено освоить способ точечной сварки по клею ВК-1МС и пересмотреть конструкцию теплозвукоизоляции.

С целью определения коррозионного состояния и выявления наиболее подверженных коррозии зон проведен анализ технического состояния среднемагистрального трехдвигательного пассажирского самолета, разработанного в ОКБ А.С. Яковлева, после его длительной эксплуатации. Полученные данные показали, что в умеренном климате коррозии подвергаются верхние прессованные панели центроплана из-за конденсата, скапливающегося в матах, а на нижней панели крыла с внутренней стороны между нервюрами развивается расслаивающая коррозия. Сильные коррозионные поражения, вплоть до сквозных, наблюдали на нижних плакированных листовых панелях фюзеляжа и пола

в районе санузлов, а также в районе порога и лонжерона багажника. На основании полученных данных разработаны рекомендации по приготовлению лакокрасочных материалов, удалению старых ЛКП, выявлению и удалению коррозии с поверхности деталей из алюминиевых сплавов, химической обработке деталей, усилению защиты участков после удаления коррозии, шпатлевке стыков прессованных панелей крыла и т. д. [18].

Истребители, созданные в ОКБ А.И. Микояна, также проходили исследования в ВИАМ, направленные на обнаружение и предотвращение коррозии. Так, в советском реактивном истребителе наблюдали повреждения остекления (рис. 15) после двух- и трехлетней эксплуатации. Жесткое крепление органического стекла стало причиной образования трещин за счет его внутренних напряжений. В качестве рекомендаций предложено заменить крепления на мягкие с использованием капроновых или лавсановых лент и клея. Помимо этого, на самолетах этого типа встречаются коррозионные повреждения нижней наружной поверхности обшивки фюзеляжа, внутренней поверхности обшивки в подпольной части, стрингеров, компенсаторов, шпангоутов в подпольной части фюзеляжа и в районе установки санузлов, элементов конструкции, расположенных в нише установки аккумуляторных батарей, и т. д.

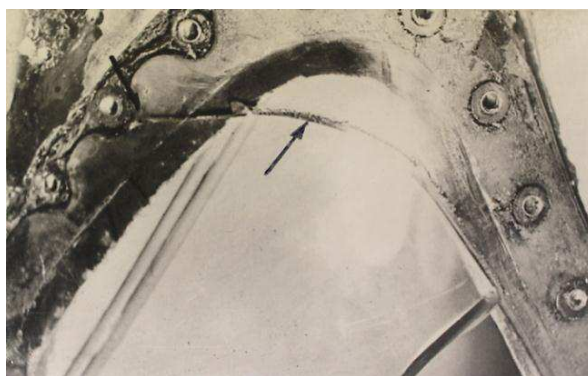


Рис. 15. Трещина стекла кабины летчика самолета, разработанного в ОКБ А.И. Микояна

Для одноместного реактивного истребителя второго поколения проводили исследования коррозионных разрушений, а именно коррозии деталей закрылка после эксплуатации в течение одного года на аэродроме, загрязненном хлоридом натрия, – основной причины разрушений. Так, например, на обшивке из сплава МА8, защищенной оксидной пленкой и ЛКП, и на анодированном и грунтованном профиле из сплава Д16-АТВ наблюдали коррозионные поражения (рис. 16). В качестве рекомендации по предотвращению подобных повреждений выдвинуто предложение – не использовать для удаления льда с аэродрома хлорид натрия [9, 10].

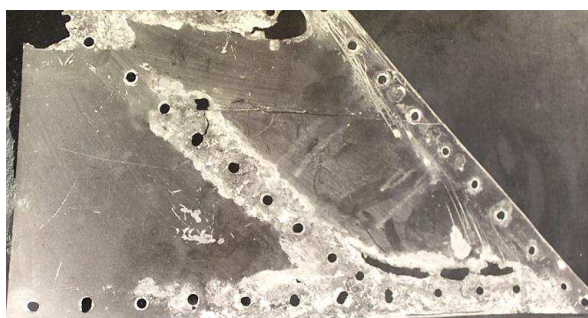


Рис. 16. Коррозия обшивки из сплава МА8, защищенной оксидной пленкой и ЛКП, закрылка самолета, разработанного в ОКБ А.И. Микояна

Основным видом повреждений легкого сверхзвукового фронтового истребителя третьего поколения разработки ОКБ А.И. Микояна стала коррозия деталей сотового клееного закрылка. Похожие повреждения наблюдали и на самолетах, созданных позднее в этом конструкторском бюро. В качестве причины повреждений заявлено проникновение воды внутрь закрылка через зазоры между обшивкой и элементами каркаса. Для решения проблемы предложено склеивать обшивку с элементами каркаса и производить уплотнение и перекрытие зазоров с помощью герметика ВИТЭФ-1, разработанного в ВИАМ.

У сверхзвукового высотного двухдвигательного военного самолета наблюдали случаи разрушения сотового клееного элерона уже после одного года эксплуатации (рис. 17). Процесс коррозии протекал из-за проникновения воды в сотовый наполнитель через неуплотненные зазоры заклепочного соединения обшивки с элементами каркаса. Для предотвращения дальнейших разрушений предложено для подобных соединений применять клеепайку.



Рис. 17. Разрушение сотового клееного элерона самолета, разработанного в ОКБ А.И. Микояна

Ряд коррозионных поражений исследовали на многоцелевом истребителе третьего поколения разработки ОКБ А.И. Микояна с верхним расположением крыла изменяемой стреловидности. Одним из случаев разрушений стала коррозия сотового клееного руля поворота вследствие проникновения в него воды. В качестве решения данной проблемы рекомендовано уплотнить зазоры клеем и герметиком, а также дренировать рули. Применение дренажа рулей поворота в 1977 г. внедрено в серийное производство изделий, что исключило накопление воды в сотовом наполнителе, а следовательно, и подобные случаи разрушения.

Для вертолетов, разработанных в ОКБ М.Л. Миля, проводили аналогичные исследования по выявлению и предотвращению коррозии. Так, у многоцелевого вертолета в ходе исследований работниками ВИАМ выявлено несколько основных видов коррозионных повреждений. Во-первых, нарушение соединений хомутов с лонжероном в лопастях смешанной конструкции несущего винта (рис. 18). Причиной данного дефекта являлась низкая прочность паяного соединения, поэтому предложено применять склеивание хомутов с лонжероном. Во-вторых, на лопастях смешанной конструкции несущего винта вертолета заметны микологические повреждения древесных материалов из-за недостаточной водогрибостойкости казеинового клея и древесины бука. Решением данной проблемы стало антисептирование древесных материалов, применение клея ФР-12 и замена древесины бука древесиной ясеня. И наконец, еще одним видом повреждений является нарушение клеевых соединений в металлических лопастях несущего винта. Причина такого вида поражений кроется в недостаточной водостойкости клея МПФ-1. Замена данного клея на клей ВК-3 позволила решить эту проблему.



Рис. 18. Трещина припаянного хомута, соединенного с лонжероном, в лопастях смешанной конструкции несущего винта вертолета, разработанного в ОКБ М.Л. Миля

В ходе эксплуатации советского многоцелевого вертолета разработки ОКБ М.Л. Миля наблюдали случаи разрушения лопасти несущего винта, а именно местное нарушение клеевого соединения отсека с лонжероном, а также разрушения лопасти по месту нарушения клеевого соединения и последующей коррозии лонжерона. Основными причинами разрушения стали невыполнение рекомендаций об усилении защиты лонжерона от коррозии, эксплуатация лопасти с нарушенным клеевым соединением и, наконец, воздействие ядохимикатов, применяемых в сельском хозяйстве. Специалисты ВИАМ предложили ряд мер для решения возникших проблем: усилить защиту лонжерона, применив клей ВК-32-200 и герметик ВИТЭФ-1; не допускать к эксплуатации лопасти с нарушениями клеевых соединений [24].

Наблюдали также случаи нарушения клеевых соединений в лопастях несущего винта изделий (рис. 19). Удалось выяснить, что повреждения появились в результате недоотверждения фенолформальдегидных клеев и выброса на них избытка масла. Контроль заполнения бачков и своевременное устранение течи в случае ее возникновения позволили устранить нарушения клеевых соединений. Помимо этого, зафиксированы случаи разрушения хвостовых отсеков рулевых винтов из-за ослабления сотового заполнителя технологическими и перфорационными отверстиями с надрывами фольги и появления вмятин на обшивке вследствие небрежной эксплуатации. Для решения проблемы даны следующие рекомендации: сократить количество технологических отверстий, исключить надрывы фольги при перфорации и повысить культуру эксплуатации лопастей [25, 26].



Рис. 19. Нарушение клеевых соединений в лопастях несущего винта вертолета, разработанного в ОКБ М.Л. Миля

В рамках работы по повышению надежности защиты от коррозии лонжеронов лопастей тяжелого многоцелевого транспортного вертолета разработки ОКБ М.Л. Миля

проведено исследование возможности замены кадмиевых вакуумных покрытий на экологически менее вредные цинковые покрытия или покрытия сплавом Zn–Al без потери защитных свойств. В результате получена система защиты лонжеронов лопастей, удовлетворяющая требованиям охраны окружающей среды и при этом не уступающая по своим свойствам ранее используемым кадмиевым покрытиям [27].

Случаи коррозии на летательных аппаратах, созданных в ОКБ Н.И. Камова, также изучались специалистами ВИАМ [28]. Так, исследование вертолета, эксплуатируемого на флагмане китобойной флотилии «Слава», показало местные отслоения клеевых валиков и валиков с клеевой прослойкой. Основными причинами отслоений стали воздействия вибрационных нагрузок от несущего винта и недостаточная эластичность клея ВК-1МС. Проблему удалось решить с помощью замены клеесварного соединения клеевым с использованием клея ВК-3 на изделиях, находящихся в эксплуатации. Данную проблему решали применением валиков герметика ВИТЭФ-1.

Современные самолеты российского производства

Существенный вклад специалисты ВИАМ внесли в совершенствование антикоррозионной защиты современных пассажирских самолетов российского производства [29].

В процессе эксплуатации самолетов очаги коррозии выявлены на деталях из алюминиевых сплавов в местах сопряжения их с коррозионностойкой сталью и титановым сплавом (рис. 20).



Рис. 20. Контактная коррозия алюминиевой детали

С целью устранения коррозионных поражений и предотвращения появления новых специалистами ВИАМ проведен анализ производственной, эксплуатационной и ремонтной документации в части антикоррозионной защиты, а также осуществлены мероприятия на авиастроительных предприятиях по оценке процессов сборки и защиты от коррозии узлов и деталей.

Итогом работы стали технологические рекомендации по восстановлению антикоррозионного покрытия [30], а также указания по применению перспективных материалов и технологий, разработанных в ВИАМ. Данные технологии были внедрены и позволяют исключить возникновение коррозии алюминиевых сплавов в контакте с титановыми сплавами и нержавеющей сталью [9, 13].

В ВИАМ проведен комплекс исследований по оценке эффективности систем защитных покрытий, применяемых в конструкции консоли крыла современного изделия авиационной техники гражданского назначения для защиты полимерных композиционных материалов, алюминиевых сплавов и их соединений, в том числе при воздействии термовлажностного старения и агрессивных сред [8, 9, 31, 32].

В настоящее время в ВИАМ для ряда российских авиационных компаний выполнены работы по установлению причин возникновения в результате применения зарубежных смывок питтинговой коррозии на элементах обшивки воздушных судов.

Проведен также комплекс исследований по изучению влияния режимов нанесения смывок, широко используемых в мировой практике для осуществления ремонтных покрасочных работ воздушного судна. По итогам работ установлено, что существующие составы и технологии их применения имеют ряд недочетов и неточностей, что может приводить к развитию питтинговой коррозии на поверхности обшивки (рис. 21). В результате выданы соответствующие рекомендации и заключения.

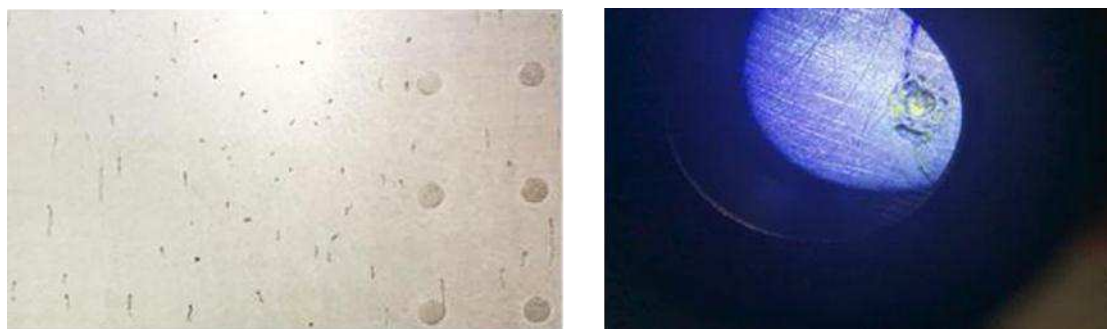


Рис. 21. Питтинговая коррозия на обшивке воздушного судна

Следует отметить, что в ВИАМ разработана смывка ВСС-1, которая имеет минимальную коррозионную агрессивность по отношению к металлическим материалам планера воздушного судна и может успешно заменить зарубежные аналоги, исключив случаи возникновения коррозии металлических материалов.

Заключения

Исследование коррозионной стойкости металлических материалов является важной и наукоемкой областью знаний. Накопление и систематизация данных о коррозионных свойствах материалов обеспечивает надежность авиационной техники при эксплуатации в различных климатических условиях.

При учете хронологии возникновения проблемных вопросов в части коррозии авиационной техники определены основные направления исследований коррозионной стойкости материалов, а также разработок антикоррозионных покрытий и составов.

Развитие конструкторской мысли, применение новых технологий изготовления и обработки металлических материалов и появление новых классов металлических материалов требуют непрерывного исследования их коррозионной стойкости, изыскания возможностей сочетания материалов в конструкции, а также разработки технологий антикоррозионной защиты и профилактических мероприятий [33].

Основные принципы создания металлических материалов, защитных и функциональных покрытий, разработанных в ВИАМ с момента его создания и по настоящее время, базируются на 90-летнем практическом опыте отечественного авиастроения и доказали свою надежность при эксплуатации отечественной и зарубежной авиационной техники.

Список источников

1. 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.

2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
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. Сучалкин Е.А. Авиации ВМФ России – 100 лет // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 1 (1). С. 372–382.
5. Гайдарев Р.В., Обертяева И.А. Легендарный самолет Великой отечественной войны – Ил-2 // Молодежный инновационный вестник. 2020. № 53. С. 20–22.
6. Мухин М.Ю. Из истории ВПК предвоенных и военных лет: организация работ в области реактивного самолетостроения в СССР в 1930-е – середине 1940-х годов // Труды Института российской истории РАН. 2017. № 14. С. 72–96.
7. Дугин Г.С., Мануйлов С.А. Обледенение воздушных судов. Условия возникновения и виды обледенения // Проблемы безопасности полетов. 2021. № 1. С. 27–40.
8. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.
9. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК на примере сплава системы Al–Li–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-109-118.
10. Антипов В.В., Медведев И.М., Кутырев А.Е., Житнюк С.В. Исследование электрохимических ненаполненных анодно-оксидных покрытий на алюминиевых сплавах марок 1163, В-1461 и В96ЦЗп.ч. при ускоренных испытаниях // Труды ВИАМ. 2019. № 6 (78). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-51-64.
11. Бутушин С.В., Семин А.В. Обработка и анализ данных условий эксплуатационной нагрузки самолетов Ту-154 // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 91–97.
12. Лебедева И.А., Харламов В.А. Особенности летной эксплуатации системы управления стабилизатором в совмещенном режиме работы на самолете Ту-154М // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. № 103. С. 75–81.
13. Юрин С.П., Громов М.С., Уваев С.Ф., Лисин О.В. Оценка состояния и достаточности ресурса парка двигателей типа АИ-24 для самолетов типа Ан-24 и Ан-26 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 20–29.
14. Арепьев К.А., Поваров О.Ю., Попов Д.П., Дубинский В.С. Обобщение результатов выполнения работ по исследованию агрегатов системы штурвального управления и системы управления механизацией крыла самолета Ан-124-100 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 29. С. 22–35.
15. Карнаух Г.Е., Арустамова И.С. Ан-124 – вершина конструкторской мысли О.К. Антонова // X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 59-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос (8–9 апреля 2020 г.): сб. науч. статей. Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2020. С. 143–146.
16. Поваров О.Ю., Арепьев К.А., Попов Д.П. Коррозионное состояние самолетов Ан-28 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 35. С. 39–49.
17. Жуков А.В. Анализ некоторых авиационных событий, связанных с эксплуатацией самолетов Ан-2 и Як-18 // Научный вестник УИ ГА. 2017. № 9. С. 28–37.
18. Громов М.С., Низев В.Я., Костенко А.В., Смирнов А.В., Степанов В.Н. Влияние пакета ремонтных накладок на напряженное состояние панели крыла пассажирского самолета // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 36. С. 110–117.
19. Арепьев К.А., Ковалевский С.А., Симонов Т.Н. Обзор условий эксплуатации парка самолетов типа Ан-24 в Российской Федерации в 2017–2018 гг. // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 28. С. 40–49.

20. Масленникова Г.Е., Арепьев К.А., Тажетдинов Р.Р., Никонов В.В., Спрысков В.Б. Исследование причин изменения характеристик набора высоты самолетов Ил-96-300 // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 140–144.
21. Куликов В.В., Шарова И.А., Петрова А.П. Ремонт сотовых металлических конструкций в самолетах Ил // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 12. С. 15–18.
22. Масленникова Г.Е., Круглякова О.В. Самолет Ил-76ТД-90ВД – новая жизнь старого планера // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 22–28.
23. Демченко О.Ф. 80 лет ОКБ имени А.С. Яковлева // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2007. № 5. С. 11–17.
24. Павлов Н.В. Вертолет Ми-2 – летающая лаборатория США // Авиационные системы. 2016. № 8. С. 53–55.
25. Урнышев Д.С., Никушкин Н.В. Анализ коррозионных повреждений силовой конструкции планера вертолетов типа Ми-8Т // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. № 6. С. 242–243.
26. Аниховская Л.И., Колобова З.Н., Углова Г.Н. Материалы для ремонта лопастей вертолетов типа Ми-8 и Ми-24 в условиях эксплуатации // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 12. С. 32–33.
27. Осипов Д.Н., Шапкин В.С. Измерение скорости развития усталостных трещин в стрингерах из материала 01420 вертолета Ми-26Т // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 153. С. 77–82.
28. Дмитриева Ю.А. Николай Ильич Камов и его вертолеты // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. № 4 (14). С. 553–554.
29. Александров Н. Перехватчик Сухой. 50 лет в строю // Двигатель. 2008. № 5 (59). С. 26–31.
30. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-388-392.
31. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Чесноков Д.В., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 1. С. 110–116.
32. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-527-546.
33. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.

References

1. 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.
2. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Abstracts of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry: in 6 vol. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
4. Suchalkin E.A. Aviation of the Russian Navy – 100 years. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, 2017, no.1 (1), pp. 372–382.
5. Gaidarev R.V., Obertyaeva I.A. The legendary aircraft of the Great Patriotic War – Il-2. *Molodezhnyy innovatsionnyy vestnik*, 2020, no. 53, pp. 20–22.
6. Mukhin M.Yu. From the history of the military-industrial complex of the prewar and war years: organization of work in the field of jet aircraft construction in the USSR in the 1930s – mid-1940s. *Trudy Instituta rossiyskoy istorii RAN*, 2017, no. 14, pp. 72–96.
7. Dugin G.S., Manuilov S.A. Aircraft icing. Conditions for the occurrence and types of icing. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2021, no. 1, pp. 27–40.
8. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.

9. Kuttyrev A.E., Chesnokov D.V., Antipov V.V., Vdovin A.I. A study of the use of combined anodic dissolution of aluminum alloys with not high sensibility to IGC evidence from alloy of Al–Li–Cu system with the purpose of predicting loss of mechanical properties at atmospheric corrosion. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-109-118.
10. Antipov V.V., Medvedev I.M., Kuttyrev A.E., Zhitnyuk S.V. The investigation of electro-chemical properties of non-sealed oxide coatings on 1163, V-1461, V96C3pch aluminum alloys during accelerated testing. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6 (78), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-51-64.
11. Butushin S.V., Semin A.V. Processing and analysis of data on the operating conditions of the loading of Tu-154 aircraft. *Sbornik nauchnykh trudov GosNII GA*, 2010, no. 311, pp. 91–97.
12. Lebedeva I.A., Kharlamov V.A. Features of flight operation of the stabilizer control system in the combined mode of operation on the Tu-154M aircraft. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2006, no. 103, pp. 75–81.
13. Yurin S.P., Gromov M.S., Uvaev S.F., Lisin O.V. Assessment of the state and adequacy of the resource of the fleet of AI-24 engines for An-24 and An-26 aircraft. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2020, no. 31, pp. 20–29.
14. Arep'ev K.A., Povarov O.Yu., Popov D.P., Dubinsky V.S. Generalization of the results of the work on the study of the units of the steering control system and the wing mechanization control system of the An-124-100 aircraft. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2019, no. 29, pp. 22–35.
15. Karnaukh G.E., Arustamova I.S. An-124 is the pinnacle of O.K. Antonova. X International. sci.-pract. conf. young scientists dedicated to 59th anniversary of Yu.A. Gagarin into space (April 8–9, 2020): Sat. scientific articles. Krasnodar: Publishing House - South, 2020, pp. 143–146.
16. Povarov O.Yu., Arepiev K.A., Popov D.P. Corrosion state of An-28 aircraft. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2021, no. 35, pp. 39–49.
17. Zhukov A.V. Analysis of some aviation events related to the operation of the An-2 and Yak-18 aircraft. *Nauchnyy vestnik UI GA*, 2017, no. 9, pp. 28–37.
18. Gromov M.S., Nizev V.Ya., Kostenko A.V., Smirnov A.V., Stepanov V.N. Influence of a package of repair pads on the stress state of a passenger aircraft wing panel. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, no. 36, pp. 110–117.
19. Arep'ev K.A., Kovalevsky S.A., Simonov T.N. Review of operating conditions for the An-24 aircraft fleet in the Russian Federation in 2017–2018. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2019, no. 28, pp. 40–49.
20. Maslennikova G.E., Arep'ev K.A., Tazhetdinov R.R., Nikonov V.V., Spryskov V.B. Investigation of the reasons for the change in the characteristics of the climb of the Il-96-300 aircraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2019, no. 1, pp. 140–144.
21. Kulikov V.V., Sharova I.A., Petrova A.P. Repair of honeycomb metal structures in Il aircraft. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*, 2016, no. 12, pp. 15–18.
22. Maslennikova G.E., Kruglyakova O.V. Aircraft Il-76TD-90VD – new life of the old airframe. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2014, no. 4 (315), pp. 22–28.
23. Demchenko O.F. 80 years of OKB named after A.S. Yakovleva. *Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*, 2007, no. 5, pp. 11–17.
24. Pavlov N.V. Mi-2 helicopter – US flying laboratory. *Aviatsionnyye sistemy*, 2016, no. 8, pp. 53–55.
25. Urnyshev D.S., Nikushkin N.V. Analysis of corrosion damage of the power structure of the airframe of Mi-8T type helicopters. *Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2010, no. 6, pp. 242–243.
26. Anikhovskaya L.I., Kolobova Z.N., Uglova G.N. Materials for the repair of blades of Mi-8 and Mi-24 helicopters under operating conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 12, pp. 32–33.
27. Osipov D.N., Shapkin V.S. Measurement of the rate of development of fatigue cracks in stringers made of material 01420 of the Mi-26T helicopter. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2010, no. 153, pp. 77–82.

28. Dmitrieva Yu.A. Nikolay Ilyich Kamov and his helicopters. Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики, 2018, no. 4 (14), pp. 553–554.
29. Aleksandrov N. Sukhoi interceptor. 50 years in service. Dvigatel, 2008, no. 5(59), pp. 26–31.
30. 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.
31. Karimova S.A., Pavlovskaya T.G., Chesnokov D.V., Semenova L.V. Corrosive activity of CFRPs and protection of metal load-bearing structures in contact with CFRP. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal, vol. 54, no. 1, pp. 110–116.
32. Lutsenko A.N., Slavin A.V., Erasov V.S., Khvatskiy K.K. Strength tests and researches of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 527–546.
33. Kablov E.N. Marketing of Materials Science, Aircraft Engineering and Industry: Present and Future. Direktor po marketingu i sbytu. 2017, no. 5–6, pp. 40–44.

Информация об авторах

Антипов Владислав Валерьевич, и.о. генерального директора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дуюнова Виктория Александровна, начальник научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Оглодков Михаил Сергеевич, заместитель начальника научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Марина Александровна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Французова Тамара Петровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козлов Илья Андреевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladislav V. Antipov, Acting Director General, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Marina A. Fomina, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Tamara P. Frantsuzova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.06.2022.

The article was submitted 03.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 06.06.2022.

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОХОЖДЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ФРОНТА ЧЕРЕЗ ОБРАЗЕЦ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

В.В. Бутаков¹, А.А. Шавнев¹, А.А. Луговой¹, Н.М. Варрик¹, В.Г. Бабашов¹

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

Аннотация. Проведены проверка принципиальной возможности количественной оценки коэффициента теплоотдачи материала при помощи стенда, а также подбор параметров эксперимента для повышения достоверности оценки коэффициента теплопроводности слоистого материала. Установлена возможность использовать в рамках одного испытания одну часть массива данных для оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне, а при обработке другой части экспериментальных данных использовать коэффициент теплоотдачи для оценки поглощаемой образцом теплоты. Предложенный метод оценки значительно проще по аппаратному обеспечению по сравнению с классическим калориметрическим методом.

Ключевые слова: теплозащитный материал, коэффициент теплопроводности, тепловой поток, высокопористый материал, математическая модель

Для цитирования: Бутаков В.В., Шавнев А.А., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Подход к построению математической модели прохождения теплового фронта через образец теплозащитного материала в условиях нестационарного теплового потока // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

Scientific article

AN APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PASSAGE OF A HEAT FRONT THROUGH A SAMPLE OF A HEAT-SHIELDING MATERIAL UNDER CONDITIONS OF AN UNSTEADY HEAT FLOW

V.V. Butakov¹, A.A. Shavnev¹, A.A. Lugovoy¹, N.M. Varrik¹, V.G. Babashov¹

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 work, the principal possibility of quantifying the heat transfer coefficient of the material using a stand was tested, as well as the selection of experimental parameters to increase the reliability of the assessment of the thermal conductivity coefficient of the layered material. It is possible to use one part of the data array within one test to estimate the heat transfer coefficient of the material on its hot side, and when processing another part of the experimental data, to use the heat transfer coefficient to estimate the heat absorbed by the sample. The proposed estimation method is much simpler in terms of hardware compared to the classical calorimetric method.

Keywords: heat-shielding material, thermal conductivity coefficient, heat flux, highly porous material, mathematical model

For citation: Butakov V.V., Shavnev A.A., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. An approach to the construction of a mathematical model of the passage of a heat front through a sample of a heat-shielding material under conditions of an unsteady heat flow. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-127-137.

Введение

Высокопористые огнеупорные материалы, работающие в широком диапазоне температур (от отрицательных до 1000 °С и более), в настоящее время являются основными компонентами теплозащитных систем современной техники [1–4]. В частности, волокнистые материалы на основе оксида кремния использовали в качестве основного компонента внешней тепловой защиты во всех летательных аппаратах Space Shuttle (материалы марок Li-900 и Li-2200) и «Буран» (материалы марок ТЗМК-10 и ТЗМК-25) [5, 6]. Основной эксплуатационной характеристикой теплоизоляционных материалов, в том числе и на основе волокон из оксидов кремния, алюминия, а также их комбинаций, является теплопроводность. Однако, поскольку теплозащитные системы состоят, помимо огнеупорных волокон, из различных компонентов, а именно – связующих, защитных покрытий, гидрофобизирующих агентов и, возможно, других добавок, то проблема моделирования теплопереноса в таких материалах – весьма сложная задача, решением которой занимались исследователи и разработчики материалов, что привело к развитию представлений об особенностях комбинированного теплопереноса в таких средах, теоретическому и экспериментальному изучению теплофизических и оптических свойств, определению влияния на них характеристик структуры композиционных материалов [7–11].

Результирующая теплопроводность волокнистого теплоизоляционного материала складывается из кондукционной составляющей теплопроводности воздуха в порах, а также кондукционной и радиационной составляющих теплопроводности минеральной матрицы. Ввиду частичной прозрачности волокон и высокой пористости материалов перенос теплоты происходит одновременно и взаимосвязано по нескольким механизмам: по твердому каркасу и газовой среде в порах, конвективным путем в объеме материала и за счет энергии излучения.

Учет всех механизмов в теоретическом виде представляет большую сложность. Практически во всех случаях процессы распространения теплоты (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение) происходят совместно [12]. Теплоизоляционные материалы содержат компоненты, претерпевающие фазовые превращения или вступающие в химические реакции.

Стенд, описанный в работах [13, 14], позволяет осуществлять односторонний нагрев образцов и получать картину распространения теплового фронта по заранее определенным точкам образца. В статье [15] дан подробный анализ способа оценки эффективной теплопроводности отдельного слоя многослойного теплозащитного материала (ТЗМ) в условиях одностороннего нагрева.

Научный интерес представляет составление модели поведения многослойного образца ТЗМ при одностороннем нагреве, пригодной для автоматизации процесса оценки теплофизических свойств по распространению теплового фронта по слоям испытанного образца.

Формализованное представление о точках, температура которых важна для понимания процесса распространения теплового потока через образец, должно позволить оптимальным образом располагать термодатчики по толщине образца, а также будет способствовать повышению точности оценки теплофизических свойств образцов.

Цель данной работы – проверка принципиальной возможности количественной оценки коэффициента теплоотдачи материала при помощи стенда [14], а также подбор параметров эксперимента для повышения достоверности оценки коэффициента теплопроводности материала.

Материалы и методы

Теплофизическая задача

Рассмотрим модель прохождения теплового потока через однослойную плоскую стенку. Графическое представление такой модели представлено на рис. 1.

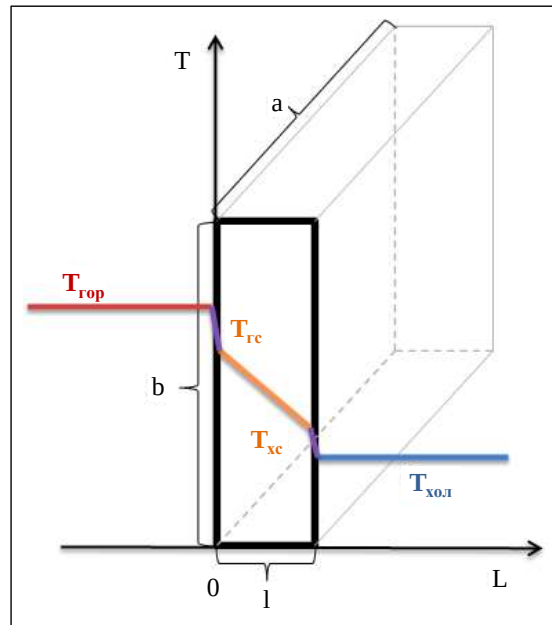


Рис. 1. Представление о распределении температуры по толщине плоской стенки при одностороннем нагреве

Закон теплопроводности Фурье в интегральной форме для плоской стенки может быть записан как

$$P = \lambda \frac{S(T_{гс} - T_{хс})}{l}, \quad (1)$$

где P – мощность потока; λ – эффективная теплопроводность материала; S – площадь сечения образца ($S = a \times b$); l – толщина образца; $(T_{гс} - T_{хс})$ – разность температур на горячей и холодной поверхности образца.

При этом тепловой поток через границу стенки (теплопередача) может быть записан следующим образом:

$$P = \alpha \cdot S(T_{ср} - T_{ст}), \quad (2)$$

где P – мощность потока; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь сечения образца ($S = a \times b$); $(T_{ср} - T_{ст})$ – разность температур среды и поверхности образца (в случае, показанном на рис. 1, это $(T_{гор} - T_{гс})$ для горячей стороны образца либо $(T_{хс} - T_{хол})$ для холодной стороны).

Коэффициент теплоотдачи α – это плотность теплового потока при перепаде температур на 1 К, который имеет размерность $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})]$. Если рассматривать тепловой поток как вектор, то он направлен перпендикулярно площадке поверхности, через которую протекает. Принципиально, что коэффициент теплоотдачи является эмпирическим

и может меняться (в случае теплопередачи на границе «поверхность–газ») в зависимости от параметров газа, картины обтекания поверхности, состояния и температуры поверхности.

В то же время в пределах однотипных испытаний различных образцов при сходных температурах коэффициент теплоотдачи можно с высокой долей достоверности считать свойством материала, зависящим только от природы испытываемого образца и его температуры ($\alpha = f(T)$).

С учетом допущений, что площадь сечения образца постоянна, а тепловой поток неразрывен и однонаправлен, можно записать для стационарного теплового потока:

$$P = \alpha_{\text{гор}} \cdot S(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}}) = \lambda \frac{S(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} = \alpha_{\text{хол}} \cdot S(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}}), \quad (3)$$

или

$$\alpha_{\text{гор}}(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}}) = \lambda \frac{S(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} = \alpha_{\text{хол}}(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}}). \quad (4)$$

Рассмотрим с учетом выражения (4) реальное испытание однослойного тонкого образца на стенде одностороннего нагрева, описанном в патенте [14]. Схема стенда приведена на рис. 2.

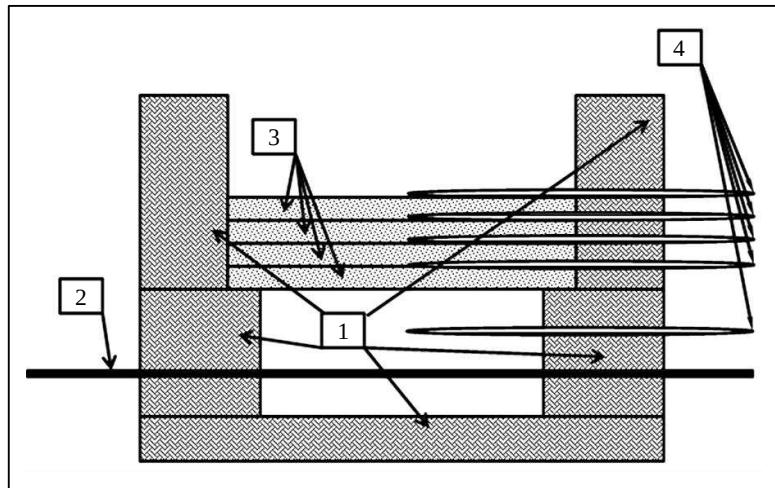


Рис. 2. Схема стенда одностороннего нагрева при испытании многослойного образца: 1 – корпус печи; 2 – нагреватели; 3 – слои образца; 4 – термопары

В начале испытания вся система имеет температуру окружающей среды ($T_{\text{хол}}$). Внутренний объем стенда начинает нагреваться. Его температуру обозначим как $T_{\text{гор}}$. Стенд позволяет в любой момент времени получить температуру нескольких точек по толщине образца или несколько точек графика функции $T(L)$ с рис. 1.

Тепловой поток через образец стационарным не является, так как происходит нагревание внутреннего объема стенда, тепловому фронту нужно время для прохождения через образец, меняется характер теплопередачи от внутреннего объема стенда к образцу. Для описания процесса обозначим временные интервалы между измерениями стенда τ . Примем также, что временной интервал между измерениями достаточно мал, чтобы изменение температуры во времени в каждой точке можно было считать линейным. Под температурами точек в момент времени с номером n примем усреднения вида $T^n = \frac{T^n + T^{n-1}}{2}$. С учетом указанных приближений можно описать состояние образца выражением

$$\alpha_{\text{гор}}(T_{\text{гор}} - T_{\text{гс}})\tau = \lambda \frac{(T_{\text{гс}} - T_{\text{хс}})}{l} \tau + \sigma U = \alpha_{\text{хол}}(T_{\text{хс}} - T_{\text{хол}})\tau, \quad (5)$$

где σU – изменение внутренней энергии образца за время τ .

При известной теплоемкости материала (c) изменение внутренней энергии можно определить как

$$\sigma U = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{s} = c \cdot l \cdot \rho \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где ΔT – изменение средней температуры образца; ρ – плотность материала.

В принятых ранее обозначениях для рис. 1 можно записать:

$$\Delta T^n = \left(\frac{T_{\text{хс}}^n + T_{\text{гс}}^n}{2} \right) - \left(\frac{T_{\text{хс}}^{n-1} + T_{\text{гс}}^{n-1}}{2} \right). \quad (7)$$

При увеличении количества слоев испытываемого образца и расположении термопар между образцами можно получить картину распространения теплового фронта через образец во времени.

Выражение (5) позволяет провести машинную обработку полученного массива данных и, рассматривая обособленно срединные слои образца во время прохождения через них теплового фронта, вычислить коэффициент эффективной теплопроводности для материала образца в форме $\lambda = f(T)$.

Принимая слои образца одинаковыми, можно также провести обработку полученного со стенда одностороннего нагрева массива данных для определения коэффициента теплоотдачи на лицевых сторонах образца.

Задача исследования

Экспериментальная задача исследования состоит:

- в подборе таких временных интервалов и скорости нагрева стенда, чтобы, с одной стороны, обеспечить значительное изменение температуры в течение временного интервала по сравнению с «шумом», а с другой – оставить временной интервал достаточно малым, чтобы тепловой поток через образец в пределах временного интервала можно было считать стационарным;
- в проверке принципиальной возможности оценки коэффициента теплоотдачи материала на горячей стороне в условиях одностороннего нагрева.

Описание образцов и условий испытания

В данной статье рассматриваются четырехслойные образцы волокнистого теплозащитного материала. Слои имеют одинаковую плотность и толщину. Термопары (спаи термопар) расположены между слоями по центру образца. Дополнительные термопары помещены в объем печи и на внешнюю (холодную) лицевую сторону образца. Регистрируются также показания управляющей термопары стенда и температура помещения вблизи стенда.

Испытания проводили при скорости нагрева 40 °С/мин, показания термопар регистрировали с частотой 1 раз в секунду.

Результаты и обсуждение

В результате испытания получена картина распределения температур по толщине образца во времени. Результирующий график с исходными данными приведен на рис. 3.

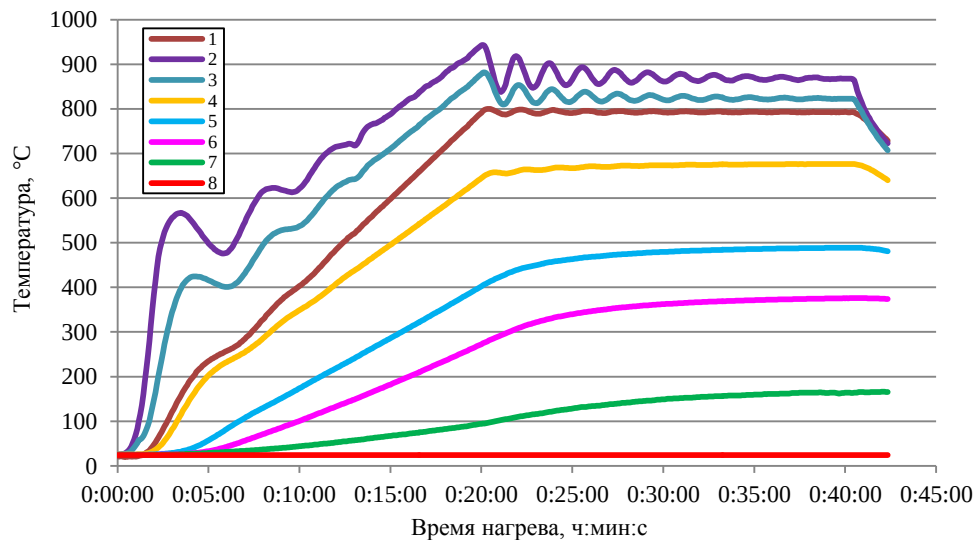


Рис. 3. Исходные данные (1 – показания управляющей термопары) для определения теплофизических свойств образца при температуре: 2 – в печи; 3 – на горячей стороне образца; 4 – между слоями 1 и 2; 5 – между 2 и 3 слоем; 6 – между 3 и 4 слоем; 7 – на холодной стороне образца; 8 – окружающей среды

Участок испытания с времени 0:01:30 (1 мин 30 с) до времени 0:03:45 (3 мин 45 с) используется для определения коэффициента эффективной теплопроводности материала; участок испытания с времени 0:01:30 (1 мин 30 с) до времени 0:20:19 (20 мин 19 с) – для определения коэффициента теплоотдачи.

В электронных таблицах Excel исходные данные отбирали для вычисления соответствующих коэффициентов и автоматизированной оценки погрешности определения. При отборе данных из выбранных массивов регулировали временные интервалы (длительность шага) в пределах от 1 до 30 с.

На рис. 4 представлены результаты вычисления коэффициента теплоотдачи образца, определенные при интервале измерений от 5 до 30 с.

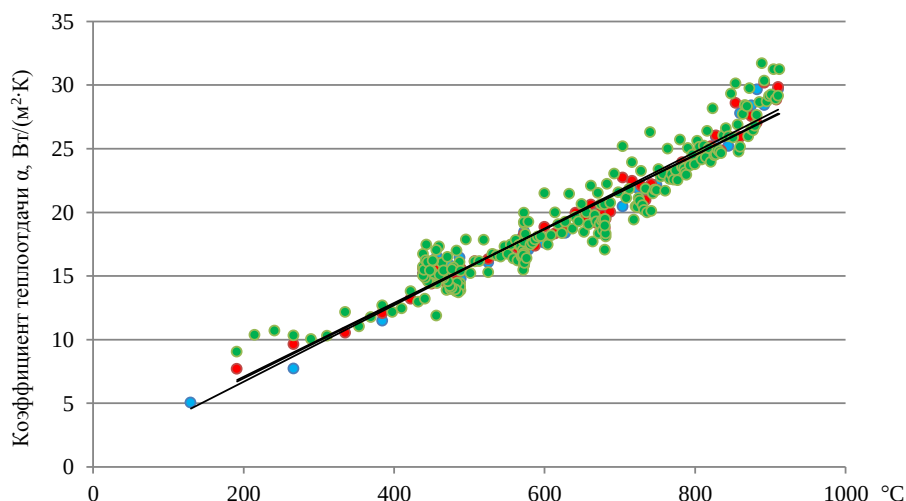


Рис. 4. Коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца, вычисляемый при длительности интервала единичного измерения 30 (●), 15 (●) и 5 с (●)

На рис. 4 приведены линейные приближения для каждого из вариантов вычисления и разброс значений. Хорошо видно, что значение коэффициента теплоотдачи

практически не зависит от длины шага в исследованных пределах. При уменьшении времени шага до 5 с соотношение шум/сигнал повышается, что сказывается на увеличении разброса. В то же время увеличение длительности шага вычислений не влияет на абсолютное значение вычисленного коэффициента. Таким образом, коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца может быть определен с точностью до 10 %.

На рис. 5 представлены результаты вычисления коэффициента эффективной теплопроводности при длине шага от 5 до 30 с.

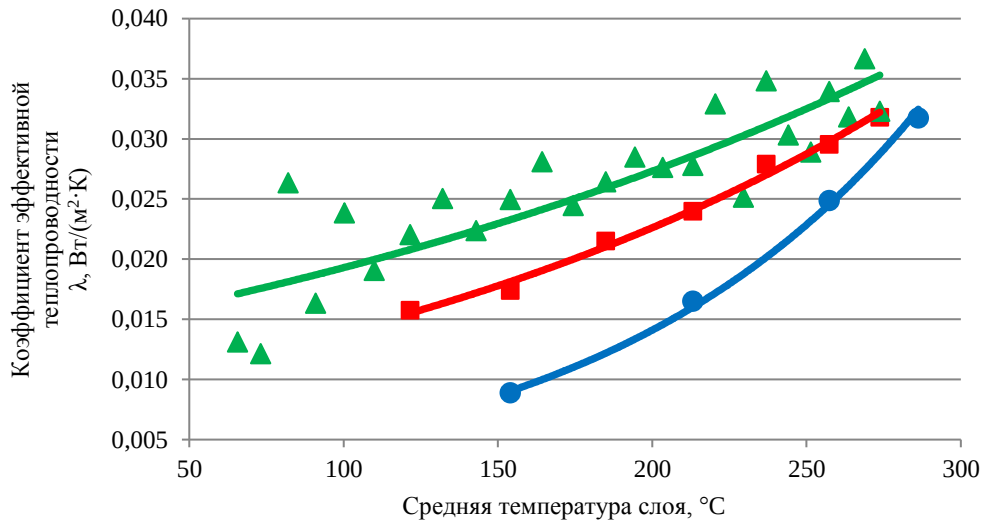


Рис. 5. Коэффициент эффективной теплопроводности, вычисляемый по экспоненциальному закону при длительности интервала единичного измерения 30 (—), 15 (—) и 5 с (—)

Вычисляли коэффициент теплопроводности первого (самого горячего) слоя. При этом в качестве калориметрического тела для определения теплопроводности первого слоя принимали три последующих.

На рис. 5 приведены экспоненциальные обобщения для каждого из вариантов вычисления и разброс значений. Следует отметить, что при уменьшении длительности шага измерений погрешность растет, однако при этом меняется и абсолютное значение вычисляемого коэффициента. Это связано с тем, что определение коэффициента эффективной теплопроводности основывается на допущении о линейности градиента температур по толщине рассматриваемого (первого) слоя и его постоянстве. Уменьшение длительности шага способствует увеличению достоверности этого допущения. Однако при дальнейшем уменьшении длительности шага уровень полезного сигнала термопары (приращение температуры) становится сопоставим с шумом термопары, и разброс значений вокруг экспоненциального приближения увеличивается до 30 %.

Вычисленные значения коэффициента теплопроводности с точностью до 30–50 % совпадают со значениями коэффициента эффективной теплопроводности, определенного классическим калориметрическим способом. Таким образом, вычисление коэффициента эффективной теплопроводности требует проведения испытаний с длительностью шага измерений не более 5 с. Увеличение длительности шага влияет на значение вычисляемой величины. Коэффициент теплопроводности может быть вычислен с погрешностью ~30 %.

На рис. 6 приведены для сравнения результаты вычислений коэффициента теплоотдачи при длительности шага в 1 с.

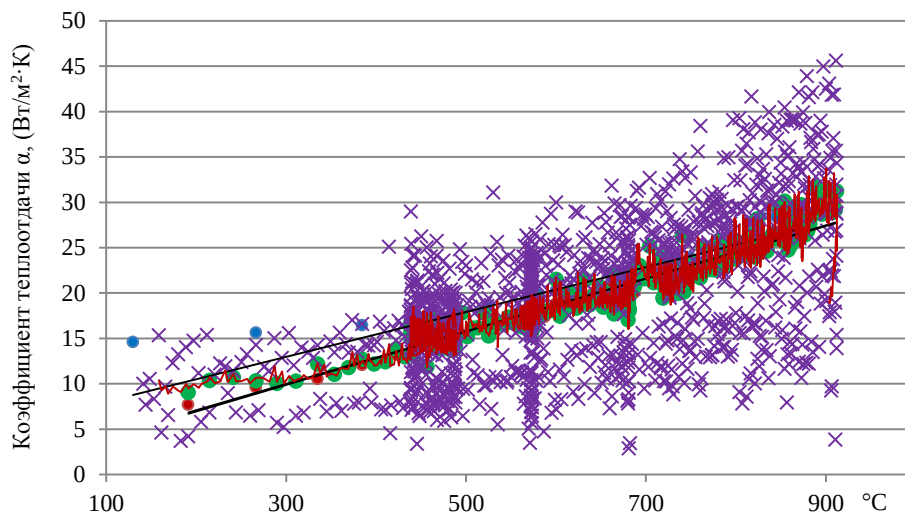


Рис. 6. Коэффициент теплоотдачи на горячей стороне образца, вычисляемый при длительности интервала единичного измерения 30 (●), 15 (●), 5 (●) и 1 с (×); — линейный фильтр ряда по 5 точкам

Видно, что соотношение сигнал/шум значительно увеличивается, однако линейная фильтрация точек позволяет получить ту же зависимость, что и при большей длительности шага.

На рис. 7 приведены результаты вычислений коэффициента эффективной теплопроводности при длительности шага в 1 с.

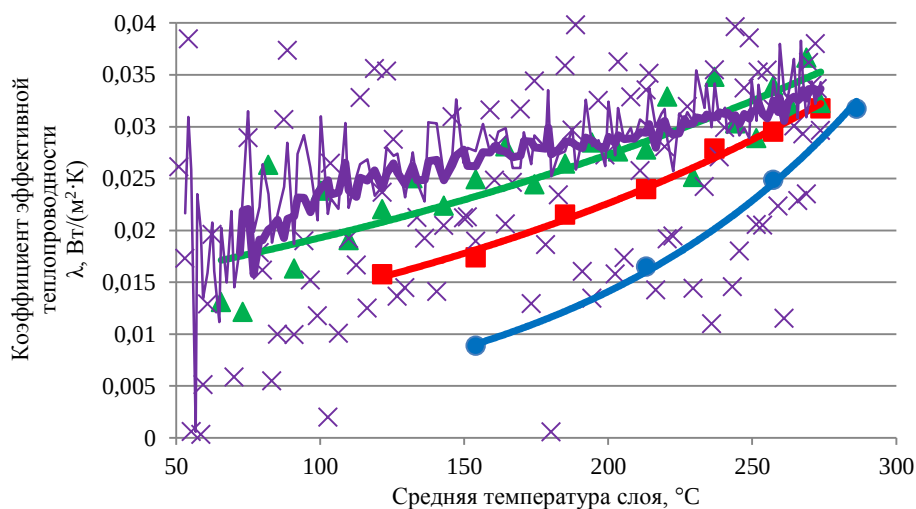


Рис. 7. Коэффициент эффективной теплопроводности, вычисляемый по экспоненциальному закону при длительности интервала единичного измерения 30 (—), 15 (—) и 5 с (—); —, — линейный фильтр ряда (×) (1 с) соответственно по 5 и 20 точкам

Соотношение шум/сигнал в таком случае становится настолько большим, что погрешность единичного измерения превышает 90 %, а результат вычисления может смещаться в диапазоны значений, не имеющих физического смысла (например, коэффициент эффективной теплопроводности не может быть отрицательным). При этом линейная фильтрация значений позволяет получить в интервале температур зависимость $\lambda = f(T)$, совпадающую с точностью 25–40 % с зависимостью, полученной calorimetric method.

Таким образом, уменьшение длительности шага до 1 с при оценке коэффициента эффективной теплопроводности целесообразно потому, что позволяет получить зависимость коэффициента эффективной теплопроводности от температуры материала с большей достоверностью. В то же время уменьшение длительности шага требует большего внимания при обработке результатов измерений.

Заключения

Проведенная работа подтвердила принципиальную возможность оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне при помощи стенда одностроннего нагрева. Эмпирический коэффициент теплоотдачи материала может использоваться при теоретическом моделировании процессов теплопередачи в материале в составе теплозащитных конструкций. Важной особенностью примененного метода оценки коэффициента теплоотдачи является то, что оценка проводится в условиях нестационарного теплового потока.

Принципиальным результатом исследования является возможность использовать в рамках одного испытания одну часть массива данных (начальный этап испытания, разогрев стенда) для оценки коэффициента теплоотдачи материала на его горячей стороне, а при обработке другой части экспериментальных данных (выдержка) использовать коэффициент теплоотдачи для оценки поглощаемой образцом теплоты.

Коэффициент теплоотдачи – и, как следствие, теплопоглощение материала при конкретном испытании – может быть оценен с погрешностью, не превышающей 10 %, что позволяет уверенно использовать получаемые результаты при дальнейшей обработке результатов измерений.

Результатом работы также стал подбор длительности шага эксперимента, позволяющий повысить точность оценки коэффициента эффективной теплопроводности материала в условиях нестационарного теплового потока. Снижение длительности шага измерений до 1–5 с позволяет оценивать коэффициент эффективной теплопроводности испытываемого материала с достоверностью 40 %. Метод оценки по-прежнему уступает в точности классическому калориметрическому методу определения коэффициента теплопроводности, но значительно проще по аппаратному обеспечению.

Для дальнейшего развития работы целесообразно провести эксперименты по влиянию дискретизации измерения температуры по координате на точность оценки коэффициента эффективной теплопроводности, а также дать оценку коэффициента теплоотдачи материала на его холодной стороне.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
2. Soboyejo W.O., Obayemi J.D., Annan E. et al. Review of High Temperature Ceramics for Aerospace Applications // Advanced Materials Research. 2016. Vol. 1132. P. 385–407.
3. Каблов Е.Н., Жестков Б.Е., Гращенков Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Исследование окислительной стойкости высокотемпературного покрытия на SiC-материале под воздействием высокоэнтальпийного потока // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 6. С. 704–711.
4. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.

6. Glass D.E. Thermal Protection Systems and Hot Structures for Hypersonic Vehicles // *Aerospace Materials and Applications* / ed. B.N. Bhat. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2018. P. 531–578. DOI: 10.2514/5.9781624104893.0531.0578.
7. Замула Г.Н., Иванов С.Н. Определение эффективной теплопроводности и излучательной способности многослойных и подкрепленных конструкций // *Ученые записки ЦАГИ*. 1970. Т. 1. № 1. С. 116–123.
8. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я. Определение теплопроводности теплозащитного материала на основе волокон оксида кремния // *Труды ВИАМ*. 2021. № 2 (96). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
10. Просунцов П.В., Майорова И.А., Зуев А.В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 7. С. 317–323.
11. Wang X., Tang Y. The Heat Transfer Model and Performance Analyses of Fibre-Enhanced Phase Change Material // *Conference: Digital Manufacturing and Automation (ICDMA) International Conference*. China, 2010. DOI: 10.1109/ICDMA.2010.419.
12. Зарубин В.С., Зарубин С.В., Кувыркин Г.Н. Математическое моделирование теплопереноса в однонаправленном волокнистом композите // *Наука и образование*. 2014. № 1. С. 270–281. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/657262.html> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.7463/0114.0657262.
13. Луговой А.А., Бабашов В.Г., Карпов Ю.В. Температуропроводность градиентного теплоизоляционного материала // *Труды ВИАМ*. 2014. № 2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.03.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2.
14. Стенд для качественной оценки теплоизоляционных материалов: пат. 156904 Рос. Федерация. № 2014138916; заявл. 25.09.14; опубл. 20.11.15.
15. Бутаков В.В., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Оценка теплопроводности слоистого высокопористого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. В печати.

References

1. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
2. Soboyejo W.O., Obayemi J.D., Annan E. et al. Review of High Temperature Ceramics for Aerospace Applications. *Advanced Materials Research*, 2016, vol. 1132, pp. 385–407.
3. Kablov E.N., Zhestkov B.E., Grashchenkov D.V., Sorokin O.Yu., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L. Investigation of the oxidation resistance of a high-temperature coating on SiC-material under the influence of a high-enthalpy flow. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 704–711.
4. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
5. Armor for "Buran". Materials and technologies of VIAM for the ISS "Energiya–Buran". Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka i zhizn, 2013, 128 p.
6. Glass D.E. Thermal Protection Systems and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. *Aerospace Materials and Applications*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2018, pp. 531–578. DOI: 10.2514/5.9781624104893.0531.0578.
7. Zamula G.N., Ivanov S.N. Determination of the effective thermal conductivity and emissivity of multilayer and reinforced structures. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1970, vol. 1, no. 1, pp. 116–123.

8. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya. Measurement of thermophysical properties rigid fiber insulation. Trudy VIAM, 2021, no. 2 (96), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-88-98.
9. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. Aviation materials and technology, 2021. no. 1 (62), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
10. Prosuntsov P.V., Mayorova I.A., Zuev A.V. Using combined heat transfer models to analyze the temperature state of thermal protection elements of reusable spacecraft. Teplovye protsessy v tekhnike, 2014, vol. 6, no. 7, pp. 317–323.
11. Wang X., Tang Y. The Heat Transfer Model and Performance Analyses of Fibre-Enhanced Phase Change Material. Conference: Digital Manufacturing and Automation (ICDMA) International Conference. Changoha, 2010. DOI: 10.1109/ICDMA.2010.419.
12. Zarubin V.S., Zarubin S.V., Kuvyrkin G.N. Mathematical modeling of heat transfer in a unidirectional fibrous composite. Nauka i obrazovanie, 2014, no. 1, pp. 270–281. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/657262.html> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.7463/0114.0657262.
13. Lugovoy A.A., Babashov V.G., Karpov Yu.V. The thermal diffusivity of the gradient thermal insulation material. Trudy VIAM, 2014, no. 2, paper no. 02. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-2-2.
14. Stand for the qualitative assessment of heat-insulating materials: pat. 156904 Rus. Federation. No. 2014138916; filed 25.09.14; publ. 20.11.15.
15. Butakov V.V., Lugovoy A.A., Varrik N.M., Babashov V.G. Assessment of thermal conductivity of a layered highly porous thermal insulation material. Aviation materials and technology, 2022. Accepted to publication.

Информация об авторах

Бутаков Вячеслав Владимирович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника НИО, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Луговой Алексей Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Варрик Наталья Мироновна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vyacheslav V. Butakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Aleksey A. Lugovoy, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia M. Varrik, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 31.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.04.2022.

The article was submitted 31.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.04.2022.

Научная статья

УДК 621.833: 621.852

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-138-149

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ
И НАВОДОРОЖИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ (обзор)
Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов**

А.Б. Лаптев¹, Л.И. Закирова¹, О.А. Загорских¹, М.Р. Павлов¹

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

Аннотация. На основании обзоров коррозионно-механического разрушения металлов (части 1 и 2) рассмотрено воздействие коррозионной среды и механических нагрузок на алюминиевые сплавы. Приведены основные теории и практические результаты определения изменения механических характеристик алюминиевых сплавов. Значения скорости растяжения должны соответствовать исследуемой системе «металл–среда» и обеспечивать соответствие механизма разрушения испытываемого материала в эксперименте на образцах механизму разрушения реальных конструкций в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: коррозионно-механическое разрушение, сероводородное растрескивание, наводороживание металла, водородная хрупкость, медленное растяжение, развитие трещины, коррозионная среда

Для цитирования: Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 3. Коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-138-149.

Scientific article

**METHODS OF INVESTIGATION OF THE PROCESSES
OF CORROSION-MECHANICAL DESTRUCTION
AND HYDROGENATION OF METALS (review)
Part 3. Corrosion cracking of aluminum alloys**

A.B. Laptev¹, L.I. Zakirova¹, O.A. Zagorskikh¹, M.R. Pavlov¹

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

Abstract. Based on reviews of the corrosion-mechanical destruction of metals (in parts 1 and 2), the impact of the corrosive environment and mechanical loads on aluminum alloys is considered. The main theories and practical results of determining changes in the mechanical characteristics of aluminum alloys are presented. The values of the tensile velocity must correspond to the investigated metal-medium system and ensure that the mechanism of destruction of the tested material in the experiment on samples corresponds to the mechanism of destruction of real structures under operating conditions.

Keywords: corrosion-mechanical destruction, hydrogen sulfide cracking, metal hydrogenation, hydrogen brittleness, slow stretching, crack development, corrosive environment

For citation: Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 3. Corrosion cracking of aluminum alloys. Trudy VIAM, 2022, no. 6 (112), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-138-149.

Введение

Атмосферная влага в зависимости от региона, климата и развития промышленного и сельскохозяйственного производства различается по составу примесей, таких как углекислый газ, сероводород, диоксид серы, аммиак, ионы в частицах аэрозолей – сульфат-, хлорид-, карбонат-анионы и др., а их наличие оказывает разрушающее действие, вызывая коррозию [1–3].

Исследование защитных свойств материалов авиационного назначения в условиях агрессивного воздействия факторов внешней среды, а также изучение механизмов коррозионного разрушения являются важнейшими направлениями развития материалов и технологий в настоящее время.

Наиболее агрессивная атмосфера для алюминиевых сплавов при климатических испытаниях на стойкость к коррозии – это экспозиция в условиях повышенной влажности и интенсивного воздействия хлорид-ионов, что отмечается в прибрежных районах. В данной работе испытания различных систем легирования алюминиевых сплавов проводили в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова, расположенном непосредственно на берегу Черного моря [4].

Для получения подробных механизмов коррозионного разрушения и установления критического состояния металла необходим комплексный параметр, характеризующий скорость общей, питтинговой, расслаивающей и межкристаллитной коррозии алюминиевого сплава. Результаты по скорости и механизму разрушения металла при ускоренных испытаниях можно получить в течение 0,5–1 года, при этом, как правило, занижается прогнозный срок безопасной эксплуатации металла и изменяется механизм коррозионного разрушения.

Наиболее важной характеристикой для материалов несущих конструкций является их механическая прочность. Коррозионные процессы оказывают значительное влияние на прочностные и усталостные характеристики металлических материалов: если общая коррозия, свойственная углеродистым сталям в водных средах, предсказуемо уменьшает несущее сечение, то локальная коррозия может привести к лавинообразному снижению прочности и несущей способности материала и всей конструкции в целом [5].

За счет адсорбционного эффекта Ребиндера при действии коррозионной среды вязкость разрушения образца из металла повышается при длительном времени выдержки образца с уже имеющейся трещиной.

Коррозионная среда влияет не только на вязкость разрушения, но и на скорость роста трещины. Это связано с рядом эффектов, возникающих только при воздействии на металл коррозионной среды: рост трещин в металлах под действием водорода, адсорбционный эффект, развитие коррозионных трещин под действием двух основных механизмов –электрохимического растворения металла в вершине трещины за счет изменения электродного потенциала поверхности и локального разрушения тонких хрупких пленок за счет деформации в процессе роста трещины.

Циклические нагрузки и коррозионная среда при одновременном воздействии не изменяют скорость роста усталостных трещин, в то время как при стационарном нагружении в аналогичных условиях воздействие среды оказывается существенным. Это объясняется тем, что механизм конечной пластической деформаций вблизи вершины трещины в таких случаях превалирует над специфическим механизмом локального разрушения при воздействии среды [6, 7].

Материалы и методы

Основными материалами воздушного судна являются алюминиевые, титановые, никелевые сплавы и коррозионностойкие стали. В последние годы прослеживается

тенденция замены металлических материалов полимерными композиционными материалами на основе эпоксидных матриц и углеродных и стеклянных волокон, а также органопластиков. Тем не менее алюминиевые сплавы в течение многих лет использовались и еще достаточно долго будут использоваться в авиации. С учетом большого количества алюминиевых сплавов в эксплуатирующейся на протяжении многих лет технике все более актуальным является вопрос сохраняемости механических характеристик алюминиевых сплавов при совокупном действии нагрузок и коррозионных сред (аэрозолей атмосферы).

Алюминиевые сплавы имеют гетерогенную (с точки зрения электрохимии) поверхность, так как с целью придания сплаву тех или иных свойств в него добавляют легирующие элементы. При легировании алюминия образуются как истинные растворы металлов, так и отдельные фазы в виде включений, пластинчатых фаз, границ зерен и др. На рис. 1 приведен поперечный спил сплава марки 1715. За счет выхода на поверхность фаз, содержащих лантан и цирконий, образуется гальваническая пара, смещается потенциал алюминия, тормозится образование защитной пассивной пленки на поверхности сплава, происходит пробой и образуется питтинг.

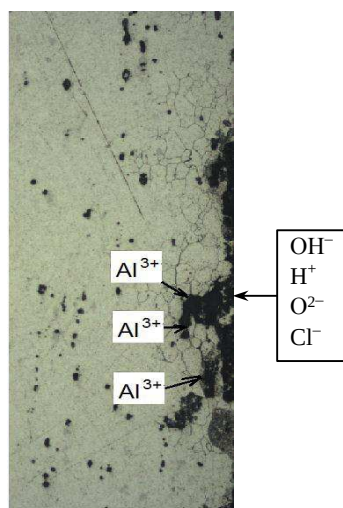


Рис. 1. Образование микротрещин в сплаве марки 1715 системы Al–La–Zr

Кроме гетерогенности, вызванной легированием, важным фактором снижения коррозионной стойкости сплава является его технологическая неоднородность. Это, прежде всего, литейная неоднородность, полученная при неравномерном процессе кристаллообразования в расплаве, перемещении легирующих элементов разной плотности под действием гравитации и наличии газовых пузырьков. Вторая технологическая причина увеличения гетерогенности и дефектности сплавов связана с их деформированием и термообработкой для получения полуфабрикатов с заданными механическими характеристиками.

Как известно, любая гетерогенность приводит к значительному снижению коррозионной стойкости сплава и, соответственно, к снижению коррозионно-механической прочности.

На рис. 2 приведены фотографии шлифов сплава марки 1424 системы Al–Cu–Mg–Li и изменение содержания алюминия и легирующих элементов на границе зерен, полученные методом рентгеноструктурного микроанализа.

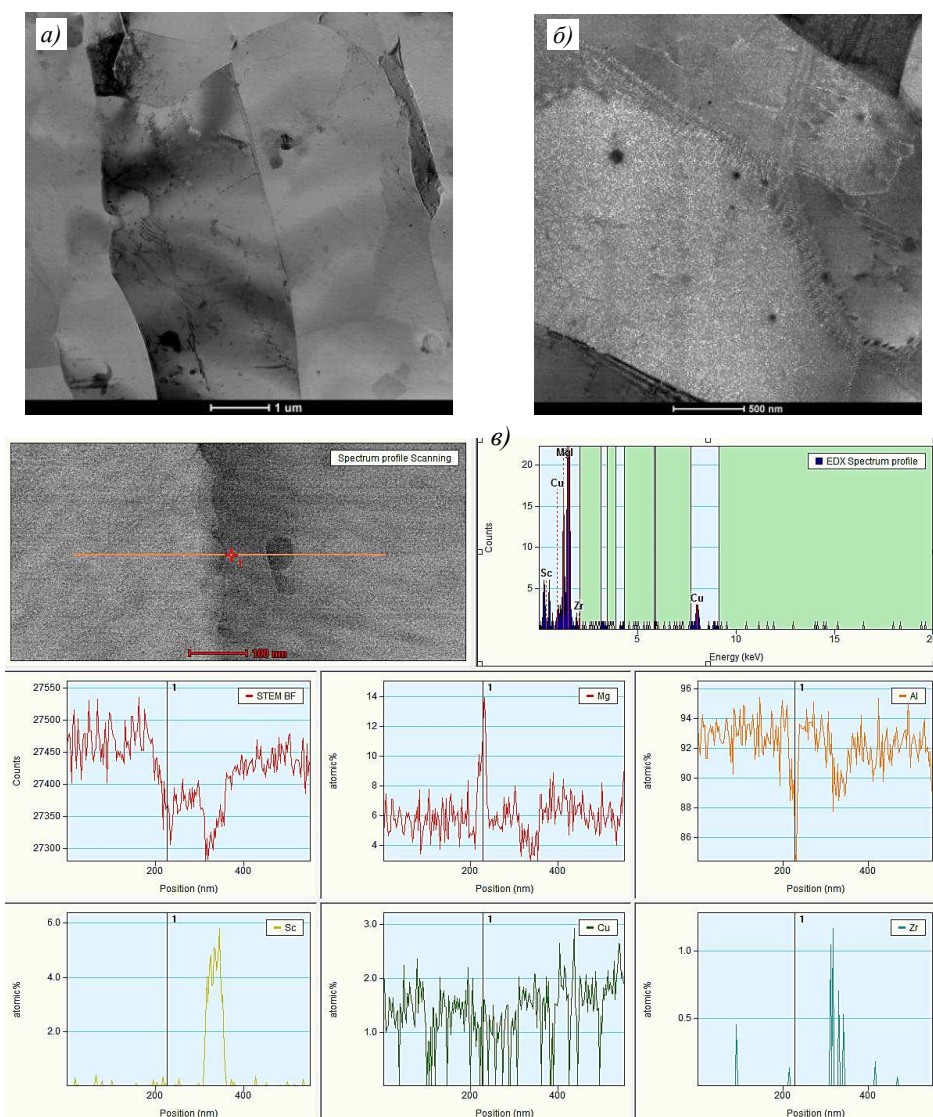


Рис. 2. Электронно-микроскопические исследования структуры и элементного состава сплава марки 1424: *a* – светлпольное изображение зеренной структуры; *б* – темнопольное изображение выделений δ' (Al_3Li)-фазы; *в* – профили распределения легирующих элементов вдоль линии, пересекающей границу зерна

Видно, что кроме границ зерен (рис. 2, *a* и *б*) имеются отдельные сферические включения. Границы обогащены магнием, а сферические включения состоят в основном из циркония и церия. С учетом того, что магний имеет более отрицательный потенциал, чем алюминий в ряду потенциалов металлов относительно водородного электрода, можно предположить, что данный сплав начинает растворяться по границам зерен за счет преимущественного растворения магния.

В соответствии с работой [8] алюминиевый сплав достигает пассивного состояния при значении потенциала в пределах $-0,5 \dots -0,7$ В относительно хлорсеребряного электрода сравнения. Любое смещение потенциала относительно этого значения ведет к питтингообразованию.

В случае одновременного действия коррозионной среды и механических (особенно растягивающих) нагрузок происходит дополнительное смещение потенциала за счет механохимического эффекта.

При анализе механохимических явлений установлено, что в деформируемом в коррозионной среде образце металла механические воздействия непосредственно влияют на скорость электрохимических реакций.

Из научно-технических литературных данных [9] известно, что потенциал поверхности металла зависит от механических напряжений, приложенных к металлу:

$$\varphi_0 = RT \ln(a^0/a_{\text{равн}}) - \Delta P V / zF,$$

где a^0 – стандартная активность; z – валентность иона; F – число Фарадея; $a_{\text{равн}}$ – термодинамическая активность при установившейся равновесности системы «металл–раствор»; R – постоянная; T – температура; V – мольный объем вещества (металла); ΔP – изменение внутреннего давления (напряжений).

Соотношение показывает, что появление избыточного напряжения ΔP ведет к уменьшению равновесной концентрации атомов, активированных механическим воздействием, к пространственной локализации механохимического эффекта (ускорения растворения деформированного металла), которая является, таким образом, термодинамически неизбежной. Если на систему одинаковых положительных ионов металла на поверхности одновременно действуют два внешних фактора – механический и электрический, то для электрохимического потенциала получаем значение параметра φ_0 (равновесный потенциал), соответствующее значению $C_{\text{равн}}$. Следовательно, уменьшение равновесного электрического потенциала системы положительных ионов ($z > 0$) вследствие наличия механического воздействия ($\Delta P > 0$) определяется выражением

$$\Delta \varphi_0 = -\Delta P V / zF.$$

Численное решение данного уравнения дает смещение поверхностного потенциала в анодную область в пределах 0,05–1,0 В, что свидетельствует об увеличении склонности алюминиевых сплавов под действием механических напряжений к пробое пассивной пленки и возникновению коррозии.

При образовании трещины процесс смещения потенциала переходит в вершину трещины, в которой происходят два взаимодополняющих процесса, приводящих к разрушению образца металла.

Количество водорода, содержащегося в кристаллической решетке алюминиевого сплава, зависит от степени и типа коррозионного поражения: при минимальной толщине коррозионных поражений количество водорода максимально; в больших полостях, вытравленных коррозией в металле, количество водорода несколько меньше, т. е. при затруднении диффузионной стадии удаления водорода через узкие зазоры при межкристаллитной коррозии водород в основном направляется в кристаллическую решетку алюминия. Содержание водорода в образцах после натурно-ускоренных испытаний в 5–10 раз превышает максимально возможное при выплавке алюминиевых сплавов, что однозначно свидетельствует о насыщении водородом в процессе коррозии алюминиевого сплава. Результаты анализа научно-технической литературы и выполненные эксперименты позволили сформулировать механизм коррозии алюминиевых сплавов в условиях повышенной концентрации хлорид-ионов на поверхности.

Многостадийный коррозионный процесс [10–13] электрохимического растворения металла и скорость коррозии зависят от времени переноса ионов-деполяризаторов к поверхности металла, продолжительности выхода иона корродирующего металла из кристаллической решетки на анодном участке и восстановления водорода на катодном участке. При межкристаллитной коррозии скорость растворения интерметаллидной фазы на границах зерен значительно превышает скорость растворения алюминиевых зерен, которые могут являться катодом по отношению к аноду интерметаллидной межзеренной фазы [14]. На рис. 3 приведена схема развития коррозионного процесса в алюминиевом сплаве.

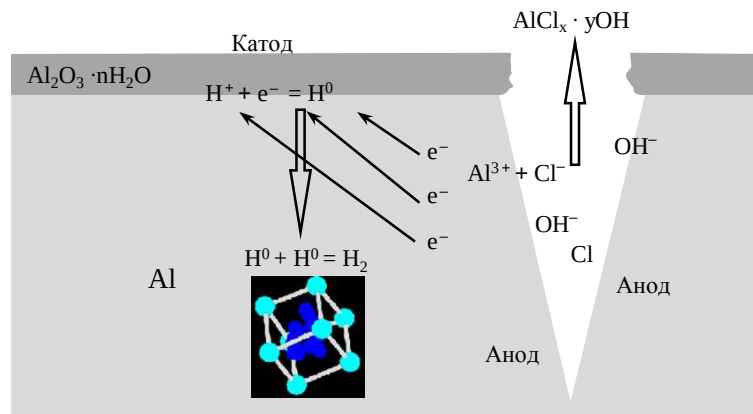


Рис. 3. Механизм наводороживания алюминиевого сплава при коррозии в хлорид-содержащих средах

Показаны основные зоны: анодная – в вершине трещины, катодная – как правило, под оксидной пленкой на алюминии. На аноде проходит полуреакция растворения алюминия за счет разрыхления поверхности оксидной пленки и смещения потенциала поверхности в анодную область. На катоде происходит полуреакция восстановления водорода из ионов гидроксония.

На рис. 4 показаны результаты оптимизированной структуры оксидных пленок на поверхности алюминия, полученные с помощью квантово-химических расчетов методом MINDO3 с использованием программы GyperChem [15]. В результате расчетов определены длины связей в кристалле алюминия и в оксиде алюминия.

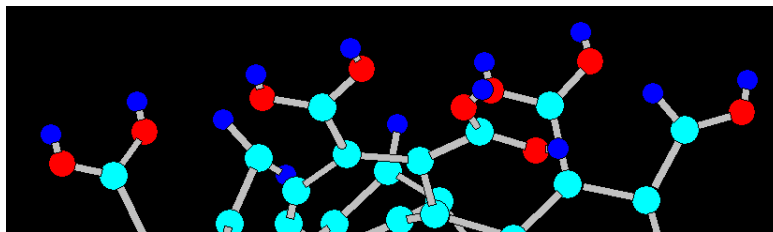


Рис. 4. Внешний вид алюминиевого кристалла с образованным слоем оксида алюминия

Видно, что расстояния между атомами $Al-Al > Al-O > Al-H > O-H$, это подтверждается в работе [16] распространенной разновидностью кристаллической решетки алюминия. Расстояние между атомами алюминия в кристаллической решетке находится в пределах 0,23–0,40 нм [17]. Межъядерные расстояния в молекуле водорода составляют 0,07 нм, расстояние между атомами в молекуле оксида алюминия находится в пределах 0,45–0,63 нм [18].

Таким образом, образующийся на границе «алюминий–оксид алюминия» атомарный водород с большей вероятностью устремится не через плотную пленку оксидов (0,23–0,40 нм), а в более разреженную кристаллическую структуру алюминиевого кристалла (0,45–0,63 нм). Происходит окклюзия водорода в алюминий.

На рис. 5 приведено распределение полей деформации вокруг трещины при проведении испытаний на скорость роста трещины усталости (СРТУ).

При неизменном значении модуля упругости – чем больше деформация, тем больше напряжения в соответствующем поле, поэтому поле 1 (рис. 5) имеет высоконапряженное состояние. Напряжение в поле 1 в 31 раз больше напряжения в поле 16, т. е. в вершине трещины напряжение значительно больше, чем на образующих ее поверхностях.

Поэтому скорость коррозии в вершине трещины значительно превосходит скорость коррозии образующих трещину поверхностей и тормозится только процессами диффузии коррозионно-активных частиц к зоне разрушения [18, 19].

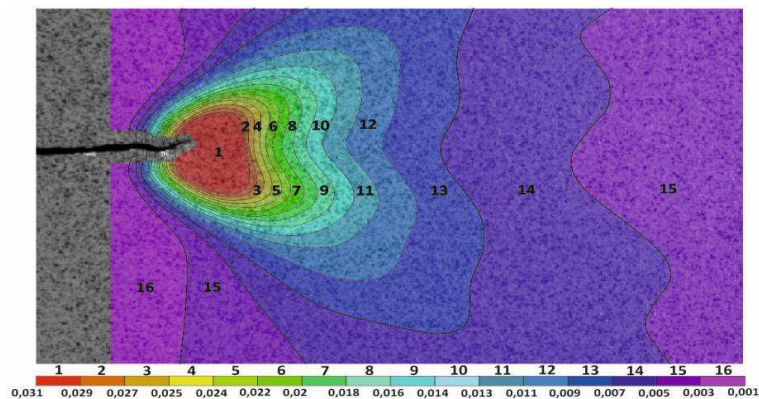


Рис. 5. Распределение полей деформации около трещины при испытаниях на СРТУ

Коррозионное растрескивание определяется двумя процессами – диффузией коррозионно-активных частиц-деполяризаторов к поверхности анодной области в вершине трещины и скоростью деформирования. В первом случае анодный участок в вершине трещины растворяется, увеличивается размер раскрытия трещины, уменьшаются напряжения и процесс роста трещины требует больших нагрузок, приложенных к образцу, и больше времени для его разрушения. При высокой скорости деформирования диффузия деполяризаторов в вершину трещины оказывается медленнее перемещения фронта трещины и коррозионная среда не оказывает влияния на разрушение образца.

На рис. 6 приведены фрактограммы образца из алюминиевого сплава Д16, который подвергали испытаниям на растяжение после 1 года натурной экспозиции в сухом тропическом климате. Общий вид поверхности образца приведен на рис. 6, а. На поверхности наблюдаются растравы и мелкие коррозионные питтинги, размер которых колеблется от 2 до 5 мкм. Размер отдельных растравов достигает 160 мкм (рис. 6, б–д). Вблизи излома присутствуют растравы и мелкие трещины (рис. 6, е).

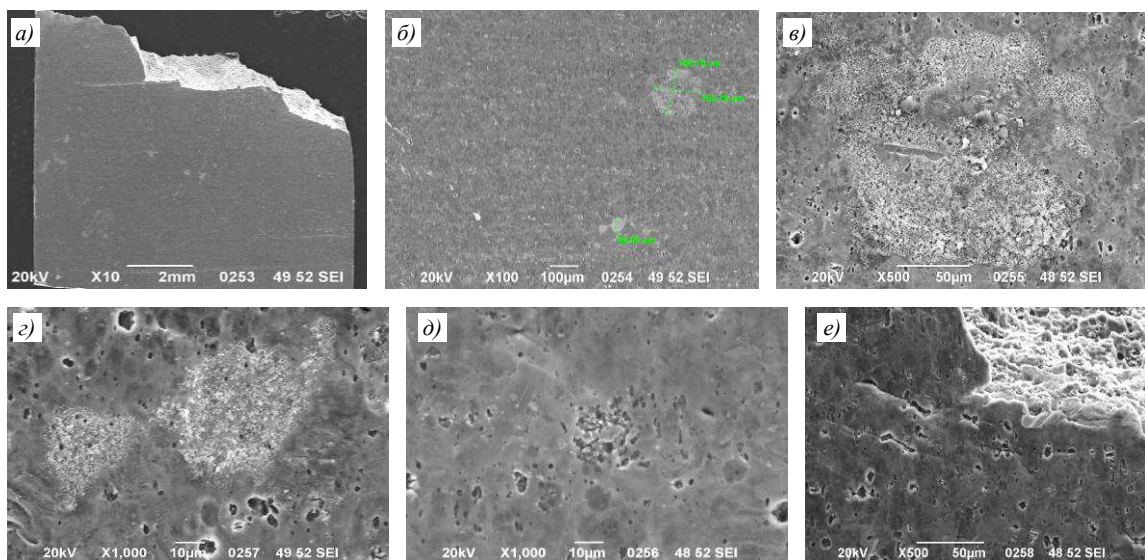


Рис. 6. Состояние поверхности образца из сплава Д16: а – общий вид; б–д – коррозионные повреждения поверхности; е – мелкие коррозионные питтинги и трещины у излома

Общий вид излома образца из сплава Д16 приведен на рис. 7, *а*. Разрушение развивается от поверхности и проходит внутризеренно, преимущественно с формированием вязкого ямочного рельефа (рис. 7, *б*). Явно выраженных коррозионных повреждений по краям излома не выявлено (рис. 7, *в*, *г*).

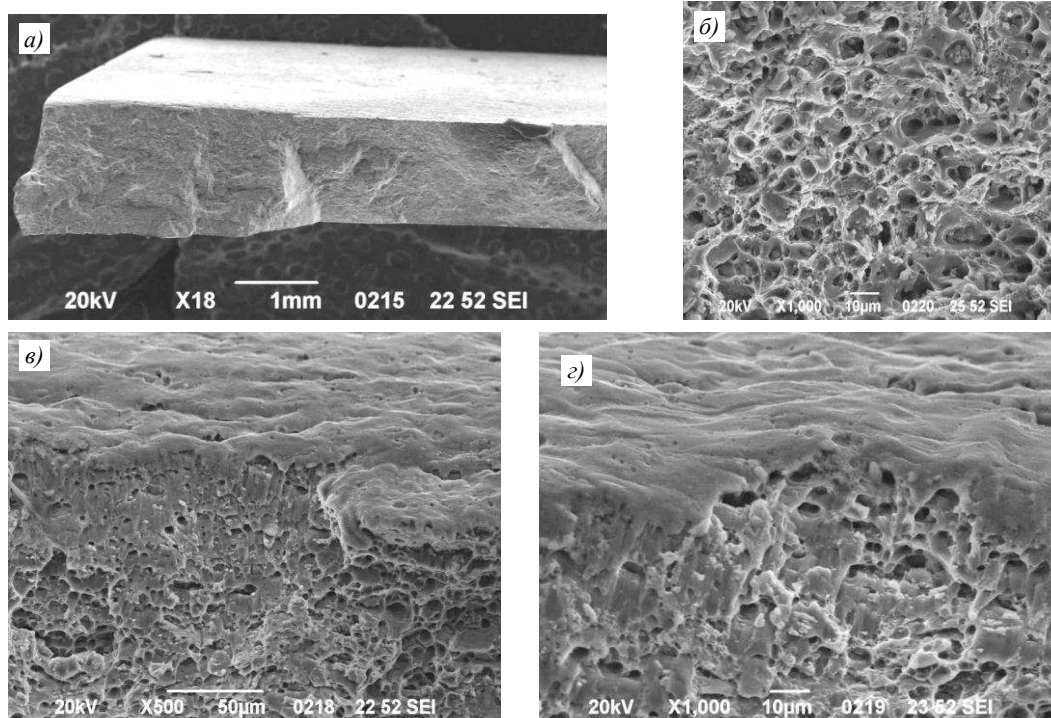


Рис. 7. Строение излома образца из сплава Д16: *а* – общий вид излома; *б* – внутризеренное разрушение, ямочный рельеф; *в*, *г* – поверхность и излом

В процессе коррозионного растрескивания преобладающее значение имеют нормальные напряжения и разрушение материала происходит по механизму отрыва.

Охрупчивание металлов в присутствии ингибиторов определяют по числу гибов на 180 градусов с перегибом по ГОСТ 13813–68. Следует отметить, что при испытаниях на «гиб–перегиб» условия нагружения не соответствуют реальным условиям работы конструкций: напряжения в образцах изменяются по знакопеременному циклу «растяжение–сжатие», в месте крепления образцов возникает неконтролируемое от образца к образцу напряженное состояние.

Все методы определения характеристик коррозионного растрескивания, связанные с необходимостью извлечения образцов из коррозионной среды и последующим разрушением их на воздухе, характеризуются низкой стабильностью результатов, так как за время между коррозионными и механическими испытаниями происходит изменение свойств материала, неконтролируемое от образца к образцу. Кроме того, эти методы не позволяют оценить коррозионное растрескивание. Высокая скорость деформирования или высокое значение приложенной нагрузки не позволяют реализоваться процессам наводороживания образца, которое происходит на катодных участках поверхности и значительно снижает пластичность металла в локальных областях вдоль образующих поверхностей трещины. При малой скорости деформирования, наоборот, успевают реализоваться все коррозионные процессы – растворения и наводороживания образца.

В условиях воздействия агрессивных коррозионных сред при высоких скоростях растяжения вязкое разрушение образцов наступает прежде, чем коррозионные процессы

окажут необходимое воздействие. При слишком малых скоростях растяжения на поверхности испытываемого материала образуются защитные пленки (процесс пассивации), замедляющие процесс коррозионного растрескивания и существенно увеличивающие время до разрушения образцов. Значения скорости растяжения должны соответствовать исследуемой системе «металл–среда» и обеспечивать соответствие механизма разрушения испытываемого материала в эксперименте на образцах механизму разрушения реальных конструкций в условиях эксплуатации. Следовательно, испытания при стандартных скоростях деформирования непригодны для экспресс-оценки коррозионно-механических свойств металлов. В большинстве систем коррозионное растрескивание происходит при скоростях деформации $\sim(10^{-5}-10^{-7})\text{ с}^{-1}$.

Заключения

Определение характеристик коррозионного растрескивания образцов из алюминиевых сплавов методически не отработано, однако во многих аспектах методы испытаний на коррозионное растрескивание сталей могут быть использованы для испытаний алюминиевых сплавов по следующим причинам: алюминий и сталь имеют одинаковые причины возникновения трещин при воздействии нагрузки и коррозионной среды – это дефекты поверхности, коррозионные язвы, питтинги и наличие гетерогенности поверхности, вызванной легирующими элементами и образованием различных кристаллических и аморфных фаз.

Алюминиевые сплавы в атмосферных условиях покрыты пленкой гидроксидов алюминия переменного состава. Поэтому алюминиевые сплавы в атмосферных условиях по характеру коррозионного разрушения и наводороживания схожи с покрытой сульфидной пленкой сталью. При испытаниях алюминиевых сплавов можно принять, что нагрузка на образец постоянная при базе испытаний 720 ч. Во время испытаний фиксируется время до разрушения образцов в зависимости от уровня напряжений и определяется пороговое напряжение при коррозионном растрескивании.

Работа выполнена в рамках соглашения Минобрнауки России № 075-11-2021-069 от 23 августа 2021 г. «Реализация мероприятий и выполнение работ по дооснащению Климатического центра коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ по испытаниям материалов, техники и сложных технических систем в природных средах, обеспечивающих комплексное развитие инфраструктуры исследовательской деятельности, повышению уровня ее доступности и росту эффективности использования».

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Мазалов И.С., Шуртаков С.В., Зайцев Д.В., Прагер С.М. Структура и свойства синтезированных методом селективного лазерного сплавления сплавов ЭП648 и ВЖ159 после имитационных отжигов // Материаловедение. 2020. № 6. С. 3–10.
2. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // Металлы Евразии. 2017. № 1. С. 2–6.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites // Journal of Physics: Conference Series. 2020. P. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
4. Лаптев А.Б., Николаев Е.В., Куршев Е.В., Горяшник Ю.С. Особенности биодеструкции термопластов на основе полиэфиров в различных климатических зонах // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.

5. Гецов Л.Б., Лаптев А.Б., Пузанов А.И. и др. Прочность порошкового материала для дисков ГТД в условиях агрессивного действия смеси хлоридов и сульфатов натрия // *Авиационная техника*. 2019. № 12. С. 14–25.
6. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
7. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Образование новых поверхностей в твердом теле на стадиях упругой и пластической деформаций, начала и развития разрушений // *Труды ВИАМ*. 2018. № 2 (62). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
8. Синявский В.С., Вальков В.Д., Будов Г.М. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 224 с.
9. Takase T., Setoguchi K., Wakahara T. Effect of Surface Roughness on Fatigue Strength of 0,25 % C Annealed Steel and Polycarbonate // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering A*. 1998. Vol. 64. No. 622. P. 1463–1467.
10. Alcantar-Modragón N., García-García V., Reyes-Calderón F. et al. Study of cracking susceptibility in similar and dissimilar welds between carbon steel and austenitic stainless steel through finger test and FE numerical model // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 116. No. 7–8. P. 2661–2686.
11. Laptev A., Kurs M., Lonskaya N. et al. Investigation of Corrosion Damage of Hydration Aluminium Alloys at Full-Scale Accelerated Tests // *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7. No. 4. P. 5061–5066.
12. Rajasekaran R., Lakshminarayanan A.K. Probing the stress corrosion cracking resistance of laser beam welded AISI 316LN austenitic stainless steel // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2021. Vol. 235. No. 17. P. 3299–3317.
13. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-7-11-11.
14. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
15. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 4 (110). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.11.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.
16. Борисова Т.М., Кастро Р.А. Диэлектрические свойства МДП – структур на основе оксида алюминия // *Материалы XII Междунар. конф. «Диэлектрики-2011»*. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2011. Т. 1. С. 356–359.
17. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // *Физическая мезомеханика*. 1998. № 1. С. 5–22.
18. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // *Вопросы материаловедения*. 2013. № 1 (73). С. 220–229.
19. Chen X., Karasz E., Badwe N., Sieradzk K. Dynamic fracture and dealloying induced stress-corrosion cracking // *Corrosion Science*. 2021. Vol. 187. Art. 109503.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Mazalov I.S., Shurtakov S.V., Zaitsev D.V., Prager S.M. The structure and properties of the selective laser laser rafting method EP648 and VH159 after simulation annealing. *Materialovedenie*, 2020, no. 6, pp. 3–10.

2. Kablov E.N. The present and future of additive technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
3. Kablov E.N., Erofeev V.T., Dergunova A.V., Deraeva E.V., Svetlov D.A. Influence of environmental factors on the processes of biodegradation of vinylester composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, pp. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1687/1/012029.
4. Laptev A.B., Nikolaev E.V., Kurshev E.V., Goryashnik Yu.S. Features of biodegradation of thermoplastics based on polyesters in different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-84-91.
5. Getsov L.B., Laptev A.B., Puzanov A.I. et al. The strength of the powder material for the GTD discs in the conditions of aggressive action of the mixture of chlorides and sodium sulfates. *Aviatsionnaya tekhnika*, 2019, no. 12, pp. 14–25.
6. Erasov V.S., Oreshko E.I. Reasons for dependence of mechanical characteristics of material fracture resistance on sample sizes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
7. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Formation of new surfaces in a firm body at stages of elastic and plastic deformations, the beginning and destruction development. *Trudy VIAM*, 2018, no. 2, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
8. Sinyavsky V.S., Valkov V.D., Budov G.M. Corrosion and protection of aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya, 1979, 224 p.
9. Takase T., Setoguchi K., Wakahara T. Effect of Surface Roughness on Fatigue Strength of 0,25 % C Annealed Steel and Polycarbonate. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering A*, 1998, vol. 64, no. 622, pp. 1463–1467.
10. Alcantar-Modragón N., García-García V., Reyes-Calderón F. et al. Study of cracking susceptibility in similar and dissimilar welds between carbon steel and austenitic stainless steel through finger test and FE numerical model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 116, no. 7–8, pp. 2661–2686.
11. Laptev A., Kurs M., Lonskaya N. et al. Investigation of Corrosion Damage of Hydration Aluminium Alloys at Full-Scale Accelerated Tests. *International Journal of Engineering and Technology*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 5061–5066.
12. Rajasekaran R., Lakshminarayanan A.K. Probing the stress corrosion cracking resistance of laser beam welded AISI 316LN austenitic stainless steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, vol. 235, no. 17, pp. 3299–3317.
13. Semenychev V.V. Corrosion resistance of alloy D16ch.-T sheets in marine subtropics. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-7-11-11.
14. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
15. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 1. Investigation of corrosion-mechanical destruction of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 2, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.
16. Borisova T.M., Castro R.A. The dielectric properties of MDP – structures based on aluminum oxide. *Materials of the XII Intern. Conf. "Dielectrics-2011"*. St. Petersburg: Herzen Rus. State Pedagogical University, 2011, vol. 1, pp. 356–359.
17. Panin V.E. Fundamentals of physical mesomechanics. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, no. 1, pp. 5–22.

18. Grinevich A.V., Lutsenko A.N., Karimova S.A. Durability of products and corrosion fatigue of structural materials. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 1 (73), pp. 220–229.
19. Chen X., Karasz E., Badwe N., Sieradzk K. Dynamic fracture and dealloying induced stress-corrosion cracking. *Corrosion Science*, 2021, vol. 187. Art. 109503.

Информация об авторах

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Закирова Лилия Ильдусовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Загорских Ольга Анатольевна, аспирант, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлов Михаил Рашитович, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anatoly B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Lilia I. Zakirova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga A. Zagorskikh, Postgraduate Student, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Mikhail R. Pavlov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.01.2022.
The article was submitted 17.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.01.2022.

РЕШЕНИЕ

VII ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

«КЛИМАТ-2022: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА МАТЕРИАЛЫ И СЛОЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»,

**посвященной 125-летию со дня рождения авиаконструктора,
ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини**

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва
27 мая 2022 г.

VII Всероссийская научно-техническая конференция «Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы» (далее – конференция), посвященная 125-летию со дня рождения авиаконструктора, ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини, состоялась 27 мая 2022 г. в онлайн-формате.

В работе конференции приняли участие ведущие ученые и специалисты Российской академии наук, государственных научных центров, национальных исследовательских университетов, предприятий и организаций различных отраслей промышленности. Участники мероприятия обсудили новейшие достижения в области актуального направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Материалы нового поколения и глубокая переработка сырья». Важнейшей составляющей данного направления признана комплексная оценка свойств новых перспективных материалов для различных отраслей машиностроения в реальных условиях эксплуатации и их способность противостоять коррозии, старению и биоповреждениям.

Большинство докладов конференции относится к тематике «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Содержание докладов отражает актуальность развития современного материаловедения в рамках Технологических платформ «Материалы и технологии металлургии» и «Новые полимерные композиционные материалы и технологии».

В докладах участников конференции рассмотрены следующие вопросы:

- исследование сохраняемости свойств материалов и тактико-технических характеристик изделий ВВСТ при воздействии климатических факторов, плесневых грибов, бактерий и эксплуатационных нагрузок;
- разработка единого нормативного базиса натуральных и ускоренных климатических испытаний, математических моделей и методик прогнозирования сохраняемости свойств материалов в изделиях ВВСТ;
- стандарты и нормативные документы для испытаний материалов и техники в природных средах;
- формирование технического облика инфраструктуры и разработка методического обеспечения национальной сети центров климатических испытаний материалов и элементов конструкций изделий ВВСТ;
- фундаментальные и прикладные исследования в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и конструкций в природных средах;
- разработка систем защиты от коррозии, старения и биоповреждений сложных технических систем, эксплуатирующихся в различных климатических зонах;

- методы и результаты исследований коррозионной агрессивности атмосферы в различных климатических регионах;
- распределение коррозионно-агрессивных частиц в аэрозолях атмосферы;
- особенности деформации и разрушения металлических и неметаллических материалов при воздействии климатических факторов;
- методы моделирования климатического воздействия на неметаллические материалы, в том числе с применением искусственных нейросетей;
- прогнозирование сохраняемости свойств материалов при воздействии климатических факторов для различных макроклиматических районов с применением методов математического моделирования и искусственных нейросетей;
- определение организмов-биодеструкторов материалов методом секвенирования;
- комплексное изучение проблем коррозии, старения и биодеструкции объектов инфраструктуры;
- методы и результаты исследований биологического поражения материалов различного назначения в условиях открытой атмосферы, пресной и морской воды.

По итогам обмена мнениями по тематике конференции ее участники решили:

1. Отметить важное научное и практическое значение конференции для специалистов промышленных предприятий и научно-исследовательских институтов.

2. Подтвердить актуальность технологий и направлений исследований, развиваемых в рамках стратегического направления 18 «Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах» «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

3. Считать приоритетной задачей разработку единого нормативного базиса натурных и ускоренных климатических испытаний, математических моделей и методик прогнозирования сохраняемости свойств материалов в сложных технических системах при подтверждении результатов ускоренных испытаний натурными в различных климатических зонах.

Поручить Организационному комитету подготовить и направить в адрес Минобрнауки России предложения по постановке соответствующих исследований в рамках приоритетных направлений, определенных Стратегией научно-технологического развития РФ, на долгосрочный период.

4. Отметить, что ключевым звеном обеспечения безотказной работы сложных технических систем является разработка систем защиты от коррозии, старения и биоповреждений, обеспечивающих длительную эксплуатацию в различных климатических зонах, оценка их эффективности на элементарных образцах, соединениях, конструктивно-подобных образцах, элементах конструкций и конструкциях.

Для высокотехнологичных и наукоемких конечных изделий необходимо разрабатывать индивидуальные методики прогнозирования изменения служебных характеристик материалов в составе изделия, исходя из ожидаемых условий эксплуатации.

5. Обратить особое внимание на возросшие мировые потери от микробиологически инициируемой коррозии (более 30% мировых потерь от коррозии металлов) и биоповреждений неметаллических материалов. Необходима реализация масштабных поисковых работ по определению организмов-биодеструкторов материалов в районах эксплуатации сложных технических систем (определение микробиологических ассоциаций, вызывающих коррозию металлов, родов бактерий и микроскопических грибов, влияющих на интенсивность и скорость деструкции полимерных материалов, а также

оценка стойкости металлических материалов к микроорганизмам-биодеструкторам методами молекулярной биологии). Требуется создание базы данных штаммов плесневых грибов и бактерий, идентифицированных методами молекулярной биологии, с целью стандартизации процедуры тестирования систем защиты сложных технических систем от биодеструкции.

6. Определить следующие перспективные направления развития: разработка методов тестирования средств защиты материалов от биодеструкции, разработка биостойких материалов и новых методов защиты, разработка методов утилизации бытовых и промышленных отходов из полимерных материалов экологически чистыми методами с применением микроорганизмов-биодеструкторов и их ферментов, разработка соответствующих технологий вторичной переработки полимерных материалов. Необходима постановка поисковых и прикладных работ по выявлению организмов-биодеструкторов полимерных материалов во всех климатических зонах, акваториях и в сточных водах промышленных предприятий.

Организационному комитету подготовить соответствующее обращение в РНФ по приоритетным научным направлениям, требующим поддержки.

7. Подтвердить актуальность и перспективность развития направления создания «цифровых двойников» конструкционных и функциональных материалов, соединений, конструктивно-подобных образцов и деталей в обеспечение разработки и квалификации материалов, подбора и прогнозирования их работоспособности, повреждаемости и разрушения с учетом ожидаемых условий эксплуатации.

8. Отметить высокий научный уровень представленных на конференции докладов. Настоящее решение обсуждено и согласовано с участниками конференции.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВИАМ – ВЕДУЩИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР В ОБЛАСТИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



- 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 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, 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.



УЛЬЯНОВСКИЙ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР



Разработка технологий и производство полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

ГЕЛЕНДЖИКСКИЙ
ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИМ. Г.В. АКИМОВА



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



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

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; 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.



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

■ полимерные связующие: ВСЭ-20, ВСЭ-21, ВСЭ-28, ВСЭ-33, ВСЭ-39, ТКС, ФН, ЭДТ-69Н, ЭНФБ-2М, БМК-5, РСФ-250;
■ клеи: ВК-15, ВК-15М, ВК-18, ВК-20, ВК-20М, ВК-53М, ВК-58, ВКП-11, 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

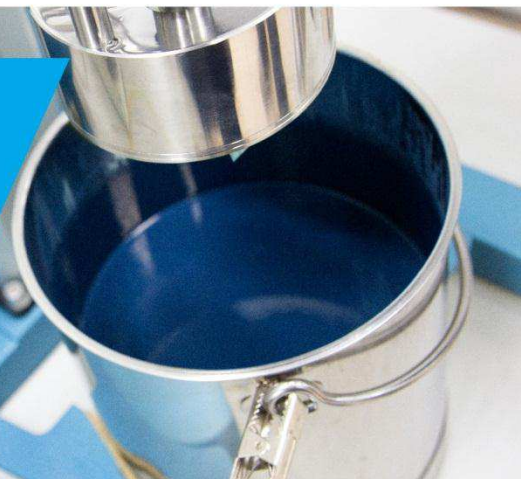
E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ppf; www.viam.ru



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

40 000 кг эмалей
в год
200 кг грунтовок
в год

300 кг шпатлевок
в год
200 кг антикоррозионных составов и паст
в год



ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- разработку рецептур, технологий изготовления и применения лакокрасочных материалов;
- фторполиуретановые эмали ВЭ-69, ВЭ-69К, ВЭ-76К;
- фторопластовые эмали ВЭ-46, ВЭ-46К, ФП-566, лак ФП-5182М;
- кремнийорганические эмали КО-856, КО-5189, ВЭ-77, грунтовка КО-0170, шпатлевка КО-0067;
- эрозионностойкие эмали ВЭ-62, ВЭ-62М;
- составы для защиты сварных нахлесточных соединений ПСП-2М (при сварке деталей из алюминиевых сплавов), КСП- (при сварке стальных деталей);
- теплоотражающая эмаль ВЭ-72.

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.ppf; 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.



ФГУП «ВИАМ» – единственный производитель термостабильных кольцевых магнитов
с радиальной текстурой системы Pr–Dy–Fe–Co–B.

Производственные мощности

5 000 шт. в год

МАГНИТЫ НА ОСНОВЕ Pr–Dy–Fe–Co–B



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_{cb}	по индукции H_{db}
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

ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ:

- кольцевые магниты с радиальной текстурой из термостабильного магнитного материала;
- цилиндрические магниты с аксиальной или диаметральной текстурой 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.pф; www.viam.ru



МОДЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ВОСКА ДЛЯ ЛИТЬЯ ДЕТАЛЕЙ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ФГУП «ВИАМ» 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	60–70
Теплоустойчивость, °С	40	45	35
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	6,5	7,5	4,5
Массовая доля золы, %	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.ppf; www.viam.ru



УЛЬЯНОВСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР



УНТЦ

ОДНО ИЗ ВЕДУЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЛЬЯНОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

ПРОИЗВОДИТ ПОЛУФАБРИКАТЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.



Производственные
мощности:

20 000

листов стекло- и
органопластиков
в год

33 000

пог.м препрегов и
семипрепрегов
в год

3500 кг

полимерных
связующих
в год

50 м²

композитной
оснастки
в год

238

единиц технологического
и исследовательского
оборудования

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



УНТЦ ПРЕДЛАГАЕТ:

- препреги на основе стеклотканей и полимерных связующих (эпоксидных, фенольных и др.);
- заготовки листового конструкционного стеклопластика ВПС-53К;
- препреги на основе углеродных тканей;
- полимерное связующее (ЭДТ-69Н, ВФТ, УП-2227Н и др.);
- листовой органопластик ВКО-19;
- формообразующая оснастка из ПКМ (с рабочей температурой до 180°C);
- листовой органопластик Органит 11ТЛ;
- изделия из ПКМ по согласованию с заказчиком.

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.виам.рф; www.viam.ru; untc.viam.ru



ВОСКРЕСЕНСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО СПЕЦИАЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ



ВЭТЦ

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

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



Производственные
мощности:

29 тонн/год бериллийсодержащие стали и сплавы

209 единиц технологического и исследовательского оборудования

10 тонн/год препреги ПКМ

7700 м²

площадь производственных помещений

13 производственных участков



ВЭТЦ ПРЕДЛАГАЕТ:

- 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 мм 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.виам.рф; www.viam.ru; vetc.viam.ru



ГЕЛЕНДЖИКСКИЙ ЦЕНТР КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВИАМ ИМ. Г.В. АКИМОВА



ГЦКИ ВИАМ

ЕДИНСТВЕННЫЙ В РОССИИ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ
В УСЛОВИЯХ МОРСКОГО КЛИМАТА ПРОВОДИТЬ
КОМПЛЕКСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ,
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ,
А ТАКЖЕ ОТРАБОТКУ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ
ОТ КОРРОЗИИ, СТАРЕНИЯ
И БИОПОВРЕЖДЕНИЙ.



Основные показатели
ГЦКИ ВИАМ:

2118 м²

площадь лабораторно-
исследовательского
корпуса

>100

единиц высокоточного
измерительного и испыта-
тельного оборудования

1100 м²

площадь атмосферного
испытательного полигона

200 м²

площадь
силового пола

По климатическим признакам центр расположен в зоне умеренно теплого климата с мягкой зимой (ГОСТ 16350) и повышенной коррозионной агрессивностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039, С3 по ISO 9223).

Лабораторные исследования:



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 одновременном воздействии
климатических факторов и статических,
динамических, в том числе циклических, нагрузок

Метеостанция СКМП-2,
работающая в непрерывном
автоматическом режиме



ГЦКИ ПРЕДЛАГАЕТ:

- комплексные испытания на коррозию, старение и биоповреждения металлических и полимерных материалов и конструкций в условиях атмосферы приморского климата, в том числе при воздействии статических и динамических нагрузок, а также в морской среде;
- изучение, отработку способов и средств защиты от коррозии и старения, определение стойкости конструкций и изделий из металлических и неметаллических материалов к воздействию коррозии, старения – для обоснования возможности использования их в изделиях перспективной техники;
- исследования по установлению обоснованных сроков службы с учетом климатических районов эксплуатации изделий.

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.pф; 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

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



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