



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ISSN 2713-0193

№4 (69)
2022

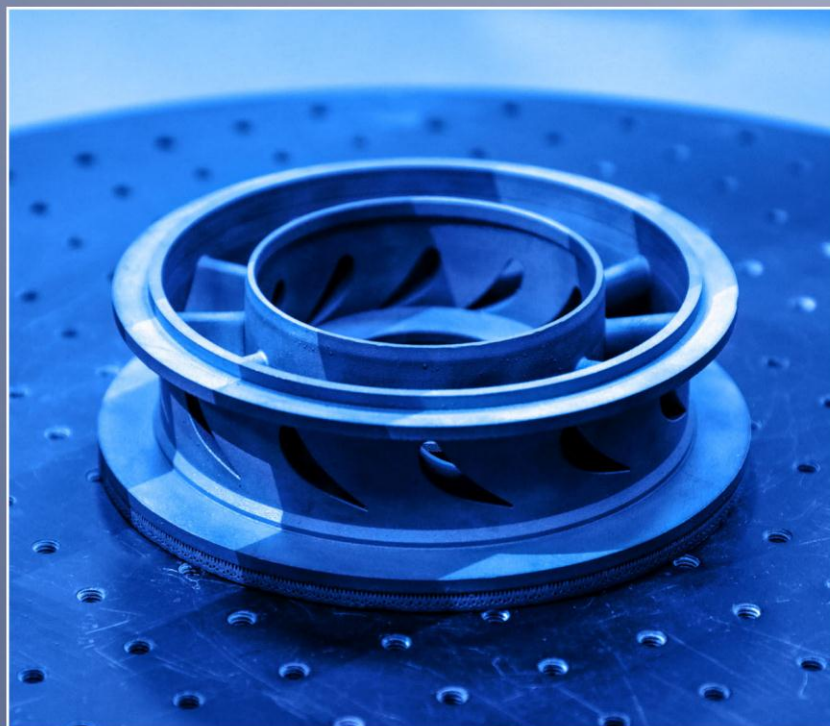
№4 (69) 2022

Авиационные

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

научно-технический журнал

АВИАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ



Жаропрочные
и конструкционные
материалы

Металлические
и неметаллические
композиционные
материалы

Защитные
и функциональные
материалы
и покрытия

Ресурсные
и климатические
испытания
материалов



www.viam.ru





1945



1982



2002



2007



2012



2017

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



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

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

25 высокотехнологичных
наукоемких производств по выпуску
253 наименований материалов
и полуфабрикатов

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

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



национальная
система
аккредитации
инфраструктура
доверия



SAFRAN
Snecma

ATLAS
MATERIAL TESTING SOLUTIONS

ptp.

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



Разработка технологий и производство
полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

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



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

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



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

АВИАЦИОННЫЕ

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

научно-технический журнал

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 ВЫПУСКА В ГОД

№ 4 (69) декабрь 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:

Берлин А.А. академик РАН, профессор
(ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН)

Габдуллин М.Т. канд. физ.-мат. наук (Казахский национальный университет им. аль-Фараби)

Гречников Ф.В. академик РАН, профессор (Самарский университет)

Епишин А.И. докт. физ.-мат. наук (ИСМАН РАН)

Красовский А.Л. канд. хим. наук (Dow Chemical Company)

Кульков А.А. докт. техн. наук, профессор (ЦНИИИМ)

Марковцев В.А. докт. техн. наук (Ульяновский НИИТ)

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

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

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

Шмотин Ю.Н. докт. техн. наук (АО «ОДК»)

Коломиец Ю.В. ответственный секретарь
(НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Издатель:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Тел.: +7 (499) 261-86-77; факс: +7 (499) 267-86-09
Эл. почта: admin@viam.ru; сайт: www.viam.ru

Редакция:

редакторы – Е.А. Аграфенкина, Ю.В. Коломиец;
корректор – И.С. Туманова; верстка – М.С. Закрежевская

Ответственный за выпуск – В.Г. Дворяшин

Адрес редакции:

Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Тел.: +7 (499) 263-87-37; +7 (499) 263-87-18; факс: +7 (499) 267-86-09
Эл. почта: journal@viam.ru; сайт: www.journal.viam.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации:
Эл № ФС77-79717 от 07.12.2020

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, наукометрическую базу РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), реферативно-информационную базу RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science). 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). Полные тексты статей с 2005 по 2019 год находятся в открытом доступе на официальном сайте журнала www.journal.viam.ru в разделе «Архив журнала». Полные тексты статей журнала текущего года доступны при оформлении коммерческого доступа к изданию. При использовании материалов в любой форме ссылка на журнал «Авиационные материалы и технологии» обязательна. В сведениях об авторах указываются данные, актуальные на момент представления рукописи в редакцию.

СОДЕРЖАНИЕ

Жаропрочные сплавы и стали

- Моисеенков В.В., Севальнев Г.С., Волков Р.Б., Дульнев К.В., Левин Е.А. Применение метода ротационнойковки для получения прутков из высокоазотистой стали ВНС-78 3
- Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Влияние технологий изготовления порошка припоя ВПр28 на основе титана на особенности полученных порошков (обзор) 16

Легкие сплавы

- Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Живучесть сварных конструкций элементов фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава В-1469 25
- Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Сравнительные исследования структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 36

Композиционные материалы

- Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями 51

Защитные и функциональные покрытия

- Закирова Л.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Мовенко Д.А., Лаптев А.Б. Особенности формирования диффузионного слоя Sn–Zn–Fe на границе гальванотермического покрытия системы цинк-олово и стали 30ХГСА с высокой защитной способностью 61
- Козлова А.А., Кондратьева О.В., Кузнецова В.А. Основные проблемы применения влагозащитных электроизоляционных материалов отечественного производства для автоматизированного селективного нанесения на печатные узлы (обзор) 72

Испытания материалов

- Руднев В.П., Мекалина И.В. Свойства органических стекол после натурального старения под нагрузкой в условиях влажных субтропиков 84
- Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава ВТ6 при усталости 96
- Морозова Л.В., Левченко А.А. Исследование биметаллических обжимов ротора генератора после эксплуатации 112
- Селезнев Д.В., Кожевникова Ю.М., Белоброва И.А., Исхужин Р.Р., Ташланов В.В. Методика определения энтропии эндо- и экзотермических эффектов в композиционных фазопереходных материалах на основе ДСК-исследования 123
- Орешко Е.И., Ерасов В.С., Сибеев И.Г., Луценко А.Н., Шершак П.В. Алгоритмы машинного обучения (обзор). Часть 2. Метрики машинного обучения. Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев. Алгоритм нейронной сети по прогнозированию свойств ферритно-мартенситной стали 132

AVIATION

MATERIALS AND TECHNOLOGIES

scientific and technical journal

PUBLICATION FREQUENCY – QUARTERLY

№ 4 (69) December 2022

Founder

NRC «Kurchatov Institute» – VIAM

Editorial board**Chairman of the Board – Editor-in-Chief****Kablov E.N.** Academician of RAS, Professor**Vice-chairmen of the Board – Deputy Editor-in-Chief****Antipov V.V.** Doctor of Sciences (Tech.)
(NRC «Kurchatov Institute» – VIAM)**Members of the Board:****Berlin A.A.** Academician of RAS, Professor (Semenov
Institute of Chemical Physics of RAS)**Gabdullin M.T.** Candidate of Sciences (Phys. & Math.)
(Al-Farabi Kazakh National University)**Grechnikov F.V.** Academician of RAS, Professor
(Samara University)**Epishin A.I.** Doctor of Sciences (Phys. & Math.)
(ISMAN RAS)**Krasovskiy A.L.** Candidate of Sciences (Chem.)
(Dow Chemical Company)**Kulkov A.A.** Doctor of Sciences (Tech.), Professor
(CRISM)**Markovtsev V.A.** Doctor of Sciences (Tech.)
(Ulyanovsk NIAT)**Petrushin N.V.** Doctor of Sciences (Tech.)
(NRC «Kurchatov Institute» – VIAM)**Postnov V.I.** Doctor of Sciences (Tech.)
(NRC «Kurchatov Institute» – VIAM)**Slavin A.V.** Doctor of Sciences (Tech.)
(NRC «Kurchatov Institute» – VIAM)**Shmotin Yu.N.** Doctor of Sciences (Tech.) (UEC)**Kolomiets Ju.V.** Executive Secretary (NRC «Kurchatov
Institute» – VIAM)**Publisher:**

NRC «Kurchatov Institute» – VIAM

17, Radio str., Moscow, 105005, Russia
Phone: +7 (499) 261-86-77; fax: +7 (499) 267-86-09
E-mail: admin@viam.ru; web: www.viam.ru**Editorial Staff:**editors – E.A. Agraferina, Ju.V. Kolomiets;
proofreader – I.S. Tumanova; make-up – M.S. Zakrzhevskaya
Responsible for issue – V.G. Dvoryashin**Editorial Address:**17, Radio str., Moscow, 105005, Russia
Phone: +7 (499) 261-86-77; fax: +7 (499) 267-86-09
E-mail: journal@viam.ru; web: www.journal.viam.ru

The mass media registration certificate No. Эп № ФС77-79717 (Dec. 07, 2020)

The Journal is included in PILA (Publishers International Linking Association) and participates in the project CrossRef. All published in the Journal articles are assigned indexes DOI (Digital Object Identifier).

The Journal is included in the abstract and information base RSCI (Russian Science Citation Index on Web of Science), the scientometric base RISC (Russian Index of Scientific Citing) and in «The List of leading reviewed scientific journals and issues, where the main scientific results of theses for competition for the scientific degrees of Doctor and Candidate of Science have to be published» (approved by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Education and Science of the Russian Federation – abbr. VAK in Russian).

The content of the Journal since 2005 to 2019 is available in an open access format at the section «Archive» on the official web-site www.journal.viam.ru.

The content of the Journal of the current year is available registration commercial access.

In section about authors' information should be indicated data which are actual at the time of submitting manuscript to the editor.

© NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022

CONTENTS**Heat-resistant alloys and steels**

- Moiseenkov V.V., Sevalnev G.S., Volkov R.B., Dulnev K.V., Levin E.A.** Application of the rotational forging method for the production of bars from high-nitrogen steel VNS-78 **3**
- Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A.** Influence of manufacturing technologies of brazing alloy powder VPr28 on powder features (review) **16**

Light-metal alloys

- Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S.** Aluminum-Lithium alloy V-1469 welded fuselage constructions survivability **25**
- Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A.** Comparative studies of the structure, features of the phase composition and mechanical properties of deformed semi-finished products from VMD16 magnesium alloy **36**

Composite materials

- Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R.** Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics **51**

Protective and functional coatings

- Zakirova L.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Movenko D.A., Laptev A.B.** Features of the formation of the Sn–Zn–Fe diffusion layer at the boundary of galvanothermal coating of systems zinc–tin and 30HGSA steel with high protective capability **61**
- Kozlova A.A., Kondratyeva O.V., Kuznetsova V.A.** The main problems of using domestically produced moisture-proof electrical insulating materials for automated selective application on printed assemblies (review) **72**

Material tests

- Rudnev V.P., Mekalina I.V.** Properties of organic glasses after natural aging under load in humid subtropics **84**
- Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R.** Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue **96**
- Morozova L.V., Levchenko A.A.** Research of bimetallic holders of generator rotor after operation **112**
- Seleznev D.V., Kozhevnikova Yu.M., Belobrova I.A., Ishuzhin R.R., Tashlanov V.V.** Method for determining the enthalpy of endo- and exothermic effects in composite phase-change materials based on DSC-research **123**
- Oreshko E.I., Erasov V.S., Sibayev I.G., Lutsenko A.N., Shershak P.V.** Machine learning algorithms (review). Part 2. Machine learning metrics. Decision trees and ensembles of decision trees. An algorithm for neural network to forecast properties of ferrite-martensite steel **132**

Научная статья

УДК 679.7.022.19

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-3-15

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РОТАЦИОННОЙ КОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВ ИЗ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ СТАЛИ ВНС-78

В.В. Моисеенков¹, Г.С. Севальнев¹, Р.Б. Волков², К.В. Дульнев¹, Е.А. Левин³

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

²Открытое акционерное общество «ОК-Лоза», Лоза, Сергиево-Посадский район, Московская область, Россия; okloza@okloza.ru

³Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная компания «Спецсталь», Москва, Россия; sim@st-steel.ru

Аннотация. Проведены исследования микроструктуры и микротвердости прутков из высокоазотистой стали ВНС-78 после ротационной ковки и поперечно-винтовой прокатки. Установлено, что применение метода ротационной ковки благодаря используемой схеме обжатия позволяет сформировать более равномерную структуру по объему профиля по сравнению с поперечно-винтовой прокаткой, а также получить меньшую пористость в центральной части прутка. Реализуемая схема деформации при ротационной ковке обеспечивает меньший размер зерна и дисперсность карбонитридной фазы, что в первую очередь требуется при изготовлении прецизионных подшипников качения высокого качества.

Ключевые слова: стали со сверхравновесным содержанием азота, высокоазотистые стали, ротационная ковка, поперечно-винтовая прокатка, структурная полосчатость, пористость

Для цитирования: Моисеенков В.В., Севальнев Г.С., Волков Р.Б., Дульнев К.В., Левин Е.А. Применение метода ротационной ковки для получения прутков из высокоазотистой стали ВНС-78 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 01. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-3-15.

Scientific article

APPLICATION OF THE ROTATIONAL FORGING METHOD FOR THE PRODUCTION OF BARS FROM HIGH-NITROGEN STEEL VNS-78

V.V. Moiseenkov¹, G.S. Sevalnev¹, R.B. Volkov², K.V. Dulnev¹, E.A. Levin³

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

²OK-LOZA Open Joint Stock Company, Loza, Sergiyev-Posadsky district, Moscow region, Russia; okloza@okloza.ru

³Limited Liability Company «RPC «Spetsstal», Moscow, Russia; sim@st-steel.ru

Abstract. The microstructure and microhardness of bars made of high-nitrogen steel VNS-78 after rotational forging and helical rolling have been studied. It has been established that the use of the rotary forging method, due to the compression scheme used, makes it possible to form a more uniform structure over the volume of the profile compared to helical rolling, as well as to obtain less porosity in the central part of the bar. The implemented scheme of deformation

during rotational forging provides a smaller grain size and dispersion of the carbonitride phase, which is primarily required when manufacturing high-quality precision rolling bearings.

Keywords: steels with superequilibrium nitrogen content, high nitrogen steels, rotational forging, helical rolling, structural banding, porosity

For citation: Moiseenkov V.V., Sevalnev G.S., Volkov R.B., Dulnev K.V., Levin E.A. Application of the rotational forging method for the production of bars from high-nitrogen steel VNS-78. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-3-15.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации сложилась ситуация, при которой в различных отраслях промышленности возникает нехватка в поставках различного вида профилей проката малотоннажными партиями. В связи с этим многие производители продукции вынуждены закупать металлопрокат крупными партиями и впоследствии отправлять его на склад до момента востребованности, что крайне неудобно как в финансовом отношении, так и в производственном.

Для решения указанной проблемы научные предприятия, такие как НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и ООО «НПК «Спецсталь», формируют мощности по малотоннажному производству на своих территориях, в кооперации разрабатывая технологии изготовления различных полуфабрикатов из перспективных материалов. В настоящее время одним из таких перспективных материалов являются стали со сверхравновесным содержанием азота, исследования которых проводятся в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–7]. Согласно зарубежной научно-технической литературе [8–10], для сталей со сверхравновесным содержанием азота используется аббревиатура HNS (High Nitrogen Steels – высокоазотистые стали). Современные высокоазотистые стали, такие как Cronidur 30, нашли широкое применение для изготовления прецизионных подшипников качения взамен используемых углеродистых сталей марок 440B и 440C [11]. Одновременное легирование углеродом и азотом позволяет получить высокий уровень прочностных характеристик без значительной потери пластичности и ударной вязкости [12–18], а формирование мелкодисперсных карбонитридов способствует снижению уровня вибраций при работе контактной пары в условиях эксплуатации.

Основной проблемой при обработке азотистых (и, в частности, сталей со сверхравновесным содержанием азота – высокоазотистых) является определение концентраций азота и углерода, при которых не будет происходить значительного разупрочнения стали наряду с достижением высокого уровня прочностных характеристик. Наличие сверхравновесных концентраций азота в твердом растворе легированных сталей в процессе механического воздействия на заготовки при горячей деформации затрудняет процесс обработки, а также может приводить к формированию пористости и рыхлоты по объему получаемого профиля. Определенные соотношения элементов внедрения в высоколегированных сталях также могут приводить к значительному охрупчиванию стали при горячей обработке давлением.

Высокоазотистая сталь ВНС-78 (30X15АМФ) предназначена для изготовления опор качения прецизионных подшипников [19, 20]. Основным достоинством данной стали является формирование мелкодисперсной избыточной фазы (карбонитридов хрома) типа $Cr_2(C, N)$ размером < 3 мкм после термической обработки. Мелкодисперсная упрочняющая фаза позволяет обеспечить высокую твердость и работоспособность прецизионных подшипников качения, а также снизить уровень вибрации при фрикционном взаимодействии тела и опоры качения.

В настоящее время для получения профилей мелкого сорта из сталей с различной степенью технологичности широкое применение нашли методы поперечно-винтовой прокатки и ротационнойковки. В связи с широким спектром проблем, которые возникают при получении различных профилей из сталей со сверхравновесным содержанием азота, данные методы зарекомендовали себя как наиболее перспективные.

Для прецизионных подшипников качения основным требованием является дисперсность формируемой структуры в опорах и телах качения для снижения уровня вибрационных воздействий при фрикционном взаимодействии деталей, что достигается высокими степенями деформации при проработке структуры металла. Метод поперечно-винтовой прокатки позволяет обеспечить высокую степень проработки структуры, однако множественность зон деформации может приводить к возникновению ликвации структуры в объеме получаемого профиля. Особенностью альтернативного метода – ротационнойковки – является осуществление деформации в условиях всестороннего сжатия с высокой дробностью при небольших единичных усилиях, что позволяет подвергать деформации малопластичные и труднодеформируемые материалы. Ротационнаяковка также обеспечивает получение прутка с хорошо проработанной структурой и равномерными свойствами как по длине, так и в поперечном сечении при высоком качестве поверхности во всем диапазоне самого разного марочного сортамента деформируемых материалов.

Цель данной работы – оценка возможности применения метода ротационнойковки для получения прутков из высокоазотистой стали ВНС-78 для изготовления круглых профилей диаметром от 2 до 20 мм.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.2. «Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали заготовки и прутки из высокоазотистой стали ВНС-78 (30X15AMФ) [20]. Концентрация азота в химическом составе данной стали достигает 0,35 % (по массе), что является сверхравновесным содержанием.

Для получения заготовок из стали ВНС-78 использовали вакуумную индукционную печь для выплавки электродов и печь для электрошлакового переплава ДЭШП-0,1 для получения слитков. Для достижения сверхравновесных концентраций процесс электрошлакового переплава проводили при избыточном давлении в 30 ат (3 МПа) молекулярного азота с добавлением в процессе переплава шихтовых материалов, содержащих азот. В качестве азотоносителей использовали азотированные ферросплавы марок ФХН-8 и ФХН-10.

Для производства малотоннажных партий профилей проката из высокоазотистой стали ВНС-78, в том числе со специальной отделкой поверхности по ГОСТ 14955–77 (с качеством чистоты поверхности h11–h8) в условиях ООО «НПК «Спецсталь» использовали радиально-ковочные машины марок В2129.01, В2129.02, В2127.01 и В2123.01, на которых осуществляли ковку профилей диаметром от 2 до 20 мм.

Ротационную ковку стали ВНС-78 со сверхравновесным содержанием азота производили последовательно с использованием трех агрегатов с деформациями за проход 10–20 % и с промежуточными подогревами. Технические характеристики радиально-ковочных машин ООО «НПК «Спецсталь» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики радиально-ковочных машин (РКМ)

Параметр	Модели машин и номера			
	РКМ-1 (B2129.01)	РКМ-2 (B2129.02)	РКМ-3 (B2127.01)	РКМ-4 (B2123.01)
Номинальное усилие, кН	800	800	500	200
Величина хода бойков, мм	4	3	2,5; 2,0	1,5; 1,2; 1,0
Частота вращения шпинделя, мин ⁻¹	220	240	530	900
Частота хода бойков, мин ⁻¹	1750	1920	4240	7200
Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки, мм	20,0	8,5	7,0	5,0
Наименьший диаметр при горячем обжатии, мм	7,0	6,0	3,5	1,68
Скорость подачи заготовки (регулировка бесступенчатая), м/с	0,1–0,14	0,036–0,048	0,042–0,067	0,051–0,115
Точность получаемой поковки, мм	±0,2	±0,2	±0,1	±0,05
Габаритные размеры, мм:				
длина	1450	1100	1300	1200
ширина	1200	1200	900	700
высота	1200	1700	1700	1600
Масса, кг	1000	1500	1100	750

Металлографический анализ структур прутков из стали ВНС-78 послековки и термической обработки проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 при увеличениях $\times 50$, $\times 200$ и $\times 1000$. Исследования микроструктуры и структурной полосчатости проводили оптическим методом в режиме светлого поля, исследования пористости – в режиме темного поля. Для выявления структуры изготовленные микрошлифы травили электролитически в 10 %-ном растворе щавелевой кислоты. Для сравнительного анализа получаемой структуры проведены исследования прутков, изготовленных методом поперечно-винтовой прокатки.

Для исследования твердости проводили дюрометрический анализ на твердомере Durascan 20 при нагрузке 10 Н по ГОСТ 2999–75.

Результаты и обсуждение

Холодная и горячая обработка заготовок из стали на ротационно-ковочных машинах является наиболее совершенным, высокопроизводительным и экономичным технологическим процессом в кузнечно-штамповочном производстве за счет высокой скорости обработки металла давлением. Радиально-ковочные машины изготавливают в горизонтальном или вертикальном исполнении как для горячей, так и для холоднойковки стальных заготовок. В данных агрегатах с одновременным действием четырех или двух бойков, бойки не перекрывают всей зоны деформирования, поэтому в их рабочем пространстве выполняется помимо осевой подачи заготовки обязательное постоянное вращение заготовки в одну сторону. Указанное вращение достигается за счет вращения манипулятора или соответствующей конструкции бойков, обеспечивающей это вращение [21].

Получаемая стальная заготовка в очаге деформации находится в состоянии всестороннего сжатия, что приводит к интенсивному течению металла в осевом направлении (рис. 1), в результате чего очаг деформации при ротационной ковке делится на две зоны. Это обеспечивается тем, что бойки образуют замкнутый контур, площадь и периметр которого уменьшаются при помощи соответствующего механизма [22].

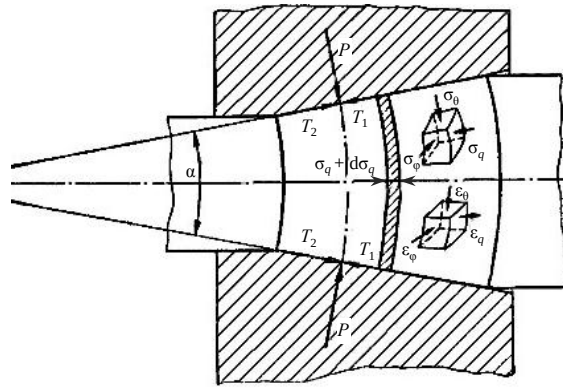


Рис. 1. Схема напряженно-деформированного состояния при ротационной ковке [23]

Процесс ротационного обжатию характеризуется одновременным применением активных сил с двух или четырех противоположных сторон заготовки. В отличие от обычной свободной ковки, при ротационном обжатию процесс деформации металла производится не за счет одного удара и единовременного большого обжатию, а путем нанесения чрезвычайно большого количества ударов, быстро следующих друг за другом одновременно по всему периметру заготовки с относительно малой степенью деформации за одно обжатие бойками, расположенными в одной плоскости и сходящимися в радиальном направлении. Обжатию следуют друг за другом с частотой 150–2000 ходов в минуту в зависимости от модели машины.

За счет комплексного воздействия на заготовку ротационная ковка позволяет обеспечивать получение круглого профиля из комплекснолегированных сталей с хорошо проработанной структурой в поверхностных слоях и сердцевине с достаточно равномерными свойствами как по длине поковки, так и в ее поперечном сечении. В результате проведенного процесса обработки давлением также формируется высокое качество поверхности во всем диапазоне размеров самого разного марочного сортамента деформируемых материалов. В соответствии с особенностями ротационной ковки (всестороннее сжатие, дробность деформации при небольших единичных усилиях) эти машины позволяют ковать малопластичные и труднодеформируемые материалы.

При больших диаметрах (10–20 мм) подача заготовки в радиально-ковочную машину осуществляется вручную (рис. 2), что связано с длиной исходной заготовки. На дальнейших проходах с диаметра 10 мм используется валковая подача, что позволяет получить заготовку с минимальной кривизной по профилю и повысить производительность.



Рис. 2. Ковка стального прутка диаметром 18 мм на радиально-ковочной машине РКМ-1 (В2129.01)

Следует отметить, что скорость продольной подачи увеличивается с уменьшением диаметра заготовки. Данный параметр имеет большое значение для получения качественной поверхности и оптимального режима течения металла в зоне деформации (рис. 3).

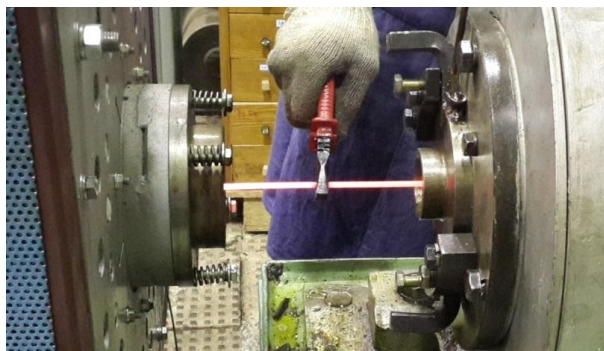


Рис. 3. Ковка стального прутка диаметром 4,25 мм на радиально-ковочной машине РКМ-3 (В2127.01)

Ковка на радиально-ковочной машине производится поэтапно до размеров готовых полуфабрикатов с припуском 0,5–0,8 мм под шлифовку, что позволяет удалить возможные поверхностные дефекты, полученные на предыдущих переделах.

В технологическом цикле участка радиально-ковочных машин предусмотрена правка прутков и полуфабрикатов на правильной косовалковой машине (рис. 4). Данный агрегат используется для правки готовой продукции и прутков, предназначенных для дальнейшей специальной обработки – шлифовки и полировки.

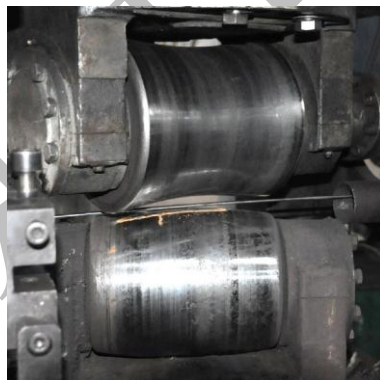


Рис. 4. Правка стального прутка на косовалковой машине

Готовые прутки для дальнейшего производства изделий из стали ВНС-78 со сверхравновесным содержанием азота представляют собой шлифованные прутки диаметром от 2 до 20 мм и соответствуют качеству отделки поверхности стали группе «В» при диаметре <3 мм и «Д» при диаметре от 6 до 20 мм по ГОСТ 14955–77. Предельные отклонения по диаметру соответствуют качеству h11.

По результатам исследования и сравнительного анализа полученной микроструктуры прутков после горячей деформации методами поперечно-винтовой прокатки и радиальной ковки с последующим отжигом установлено, что после получения прутков на радиально-ковочной машине сформирована более равномерная структура, чем после поперечно-винтовой прокатки (рис. 5). Основным недостатком поперечно-винтовой прокатки являются множественные зоны деформации с различным напряженно-деформированным состоянием, что при получении заготовки может приводить к

формированию «скрученных» участков в структуре деформируемого металла. Исследования структуры образцов прутков, полученных данным методом, позволили подтвердить наличие локальных «скрученных» зон в структуре высокоазотистой стали ВНС-78 (рис. 6).

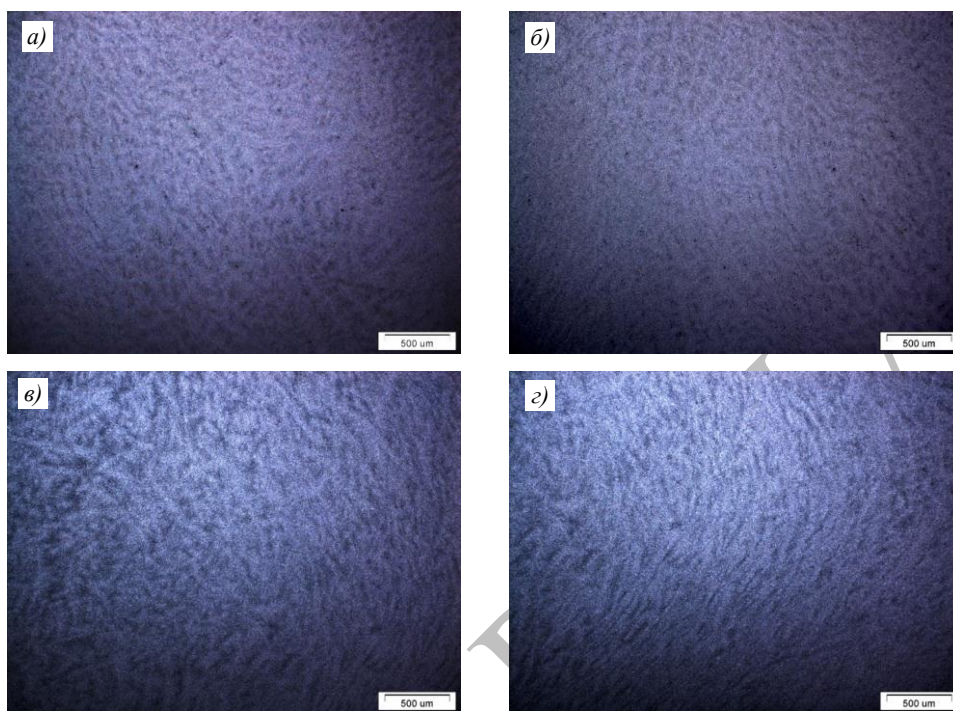


Рис. 5. Микроструктура прутка (поперечный образец) из стали ВНС-78 (30X15АМФ) после ротационнойковки на радиально-ковочной машине (а, б) и поперечно-винтовой прокатки (в, з): а, в – центр образца; б, з – край образца

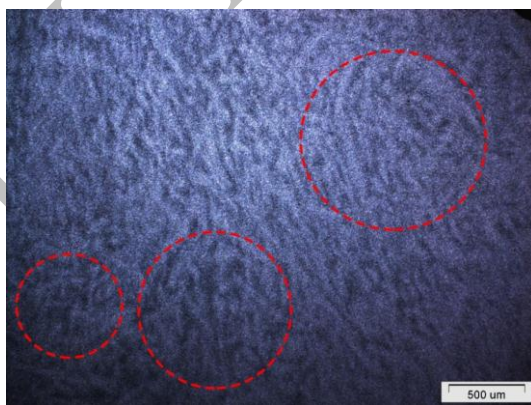


Рис. 6. Микроструктура прутка (поперечный образец) из стали ВНС-78 (30X15АМФ) после поперечно-винтовой прокатки (контуром обозначена «скрученная» структура стали)

При обоих методах горячей деформации формируется структурная полосчатость, причиной образования которой является неравномерность деформации по сечению профиля при его получении. В микроструктуре образцов после ротационнойковки присутствуют локальные зоны с полосчатостью в центральной части поверхности (рис. 7, а, б). На образцах прутков после поперечно-винтовой прокатки наблюдается более высокая степень полосчатости по всему объему профиля с увеличением угла наклона полос при передвижении от центра к краю образца (рис. 7, в, з).

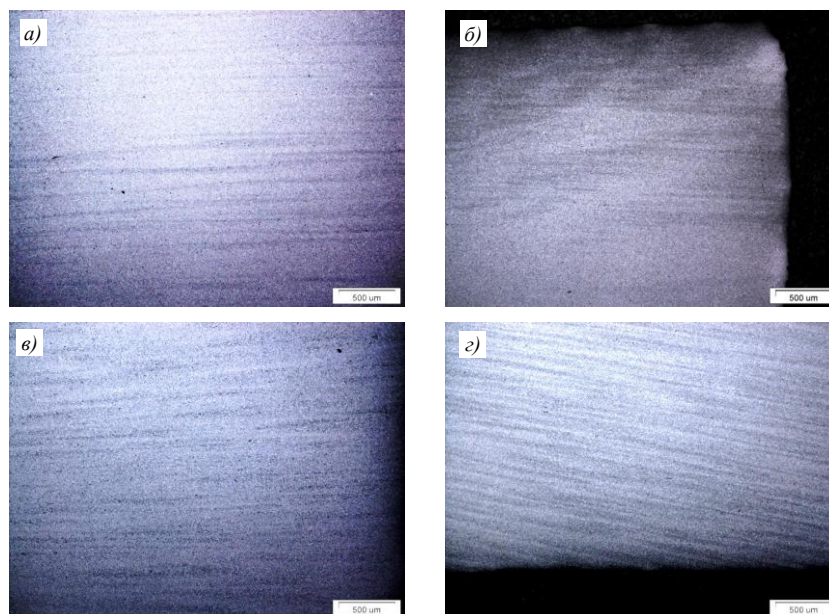


Рис. 7. Структурная полосчатость образца прутка диаметром 16 мм после ротационнойковки на радиально-ковочной машине (*а, б*) и поперечно-винтовой прокатки (*в, з*): *а, в* – центр образца; *б, з* – край образца

Для получения профилей сплошного сечения с помощью поперечно-винтовой прокатки необходимо максимально устранить влияние тангенциальной деформации, которая является основной причиной образования центральной пористости в получаемой заготовке. Устранение данного влияния – сложная задача, вследствие чего в получаемых полуфабрикатах достаточно часто формируется центральная пористость – например, как в образцах прутков из стали ВНС-78 (рис. 8, *а, б*). Наличие светлых участков в режиме темного поля свидетельствует о наличии пустот в данном сегменте образца.

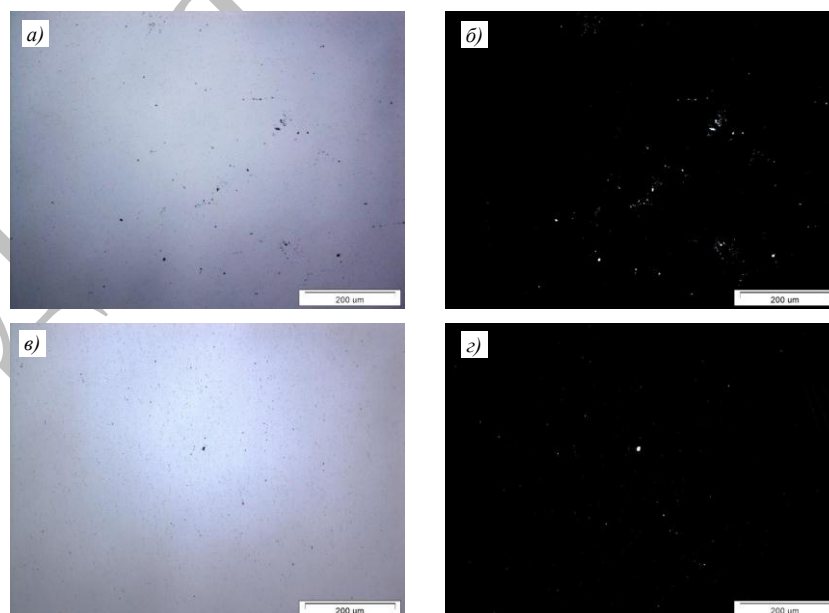


Рис. 8. Изображение пористости в центре образца прутка диаметром 16 мм после поперечно-винтовой прокатки (*а, б*) и ротационнойковки на радиально-ковочной машине (*в, з*) в режиме: *а, в* – светлого поля; *б, з* – темного поля

Ввиду того, что при ротационной ковке формируется более равномерное напряженно-деформированное состояние в объеме получаемого полуфабриката по сравнению с поперечно-винтовой прокаткой, наличие центральной пористости практически исключается (рис. 8, в, г).

Микроструктура после деформации и последующего отжига в обоих случаях состоит из феррито-карбидной смеси, однако наблюдается различие в дисперсности избыточных фаз и размере зерна (рис. 9). В образцах прутков после ротационнойковки и последующего отжига формируется более мелкозернистая структура, а также меньший размер избыточных фаз. Средний размер зерна в образцах после ротационнойковки составляет 20 мкм, в то время как для поперечно-винтовой прокатки 35–40 мкм.

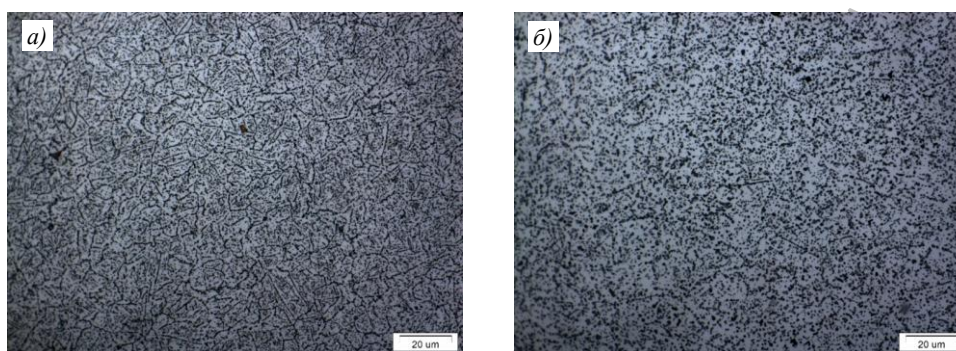


Рис. 9. Микроструктура образца после ротационнойковки на радиально-ковочной машине (а) и поперечно-винтовой прокатки (б) с последующим отжигом

Несомненным преимуществом ротационнойковки является равномерная проработка поверхности образца с высокой степенью деформации при получении профилей тонкого сечения, о чем свидетельствует полученное распределение микротвердости в образце (рис. 10). Результаты измерения микротвердости на образцах после поперечно-винтовой прокатки показывают меньшую стабильность значений. Среднее квадратичное отклонение твердости на образце, полученном методом ротационнойковки, составляет ± 3 единицы, в то время как отклонение твердости на образце после поперечно-винтовой прокатки составляет ± 8 единиц. Высокое значение среднего квадратичного отклонения, а также неравномерность распределения микротвердости свидетельствует о сильной структурной полосчатости в полученном профиле.



Рис. 10. Распределение микротвердости по толщине образцов из стали ВНС-78 после ротационнойковки на радиально-ковочной машине (Δ) и поперечно-винтовой прокатки (○) с последующим отжигом

Прутки после ротационнойковки и последующего отжига обладают более высокой твердостью (среднее значение 270 HV_{0,05}), чем после поперечно-винтовой прокатки (среднее значение 240 HV_{0,05}), что свидетельствует о лучшей проработке структуры с более высокой степенью обжатия полученного профиля.

Заключения

Высокоазотистые стали являются перспективными материалами для изготовления высоконагруженных деталей машиностроения. Однако в связи со спецификой их получения, а также обширной системой легирования, получение полуфабрикатов из данных сталей может быть связано с рядом трудностей. Наиболее перспективными методами для получения профилей тонкого сечения из сталей со сверхравновесным содержанием азота являются ротационная ковка и поперечно-винтовая прокатка.

По результатам исследования структуры установлено, что для получения круглых профилей ротационная ковка является наиболее подходящим методом. Прутки, полученные по данной технологии, обладают меньшей полосчатостью, более равномерной структурой, меньшей центральной пористостью, меньшим размером зерна (20 мкм – для ротационнойковки; 35–40 мкм – для поперечно-винтовой прокатки) карбонитридной фазы по сравнению с прутками, полученными методом поперечно-винтовой прокатки.

Совокупность таких преимуществ, как проработанность структуры, стабильность микротвердости, отсутствие значительной полосчатости и пористости, свидетельствует о перспективности применения метода ротационнойковки для получения профилей малого сечения при изготовлении прецизионных изделий.

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. 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. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
4. 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.
5. Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Виноградов С.С. Особенности разрушения деталей крепежа из конструкционной стали // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-66-74.
6. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
7. 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: 15.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
8. Berns H., Escher C., Streich W.D. Martensitic high nitrogen steel for applications at elevated temperature // Materials science forum. Trans Tech Publications Ltd, 1999. Vol. 318. P. 443–448.
9. Berns H., Ehrhardt R. Carbon or nitrogen alloyed quenched and tempered stainless steel – comparative study // Steel research 67. 1996. No. 8. P. 343–349.

10. Stein G., Hucklenbroich I., Wagner M. P 2000-A new austenitic high nitrogen steel for power generating equipment // Materials science forum. Trans Tech Publications Ltd, 1999. Vol. 318. P. 167–174.
11. 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: 22.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
12. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents // Russian Metallurgy (Metally). 2021. Vol. 2021. Is. 10. P. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.
13. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
14. Банных И.О., Банных О.А., Анцыферова М.В. и др. Обоснование выбора состава и выплавка среднеуглеродистой низколегированной деформационно-упрочняемой азотсодержащей стали в условиях электрошлакового переплава при повышенном давлении азота // Электрометаллургия. 2018. № 5. С. 24–29.
15. Гончаревская Д.А. Химико-термическая обработка сталей со сверхравновесной концентрацией азота // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020. № 8 (49). Ст. 05. URL: <http://ptsj.ru> (дата обращения: 21.12.2021). DOI: 10.18698/2541-8009-2020-08-636
16. Гончаревская Д.А. Массоперенос азота и углерода в стали со сверхравновесной концентрацией азота при диффузионном насыщении // Будущее машиностроения России. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 117–120.
17. Блинов В.М., Лукин Е.И., Блинов Е.В., Самойлова М.А. Особенности разрушения при растяжении сварных соединений высокоазотистой аустенитной стали 05X22AG16H8M с различным содержанием азота // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 3. С. 24–29.
18. Блинов В.М., Костина М.В., Лукин Е.И. и др. Влияние термической обработки на структуру и механические свойства низколегированной стали 10X3A со сверхравновесным содержанием азота // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 7. С. 38–41.
19. Бакрадзе М.М., Вознесенская Н.М., Леонов А.В., Крылов С.А., Тонышева О.А. Разработка и исследование высокопрочной коррозионно-стойкой стали для деталей подшипников // Metallurg. 2019. № 11. С. 39–44.
20. Высокопрочная коррозионно-стойкая сталь: пат. 2724766 Рос. Федерация. № 2019115908; заявл. 23.05.19; опубл. 25.06.20.
21. Комаров О.С., Ковалевский В.Н., Керженцева Л.Ф. и др. Материаловедение и технология конструкционных материалов / под общ. ред. О.С. Комарова. 3-е изд., испр. и доп. Минск: Новое знание, 2009. 671 с.
22. Головня В.Г. Технология деталей радиоаппаратуры. М.: Радио и связь, 1983. 296 с.
23. Радюченко Ю.С. Ротационнаяковка. М.: Машгиз, 1962. 186 с.

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. 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. Russia Needs New Generation Materials. *Redkiye zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
4. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.

5. Grigorenko V.B., Morozova L.V., Vinogradov S.S. Features of destruction of details of fixture from the constructional steel. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4 (64), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-66-74.
6. Gromov V.I., Kurpyakova N.A., Korobova E.N., Sedov O.V. New heat resistant steel for aircraft bearings. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
7. 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: January 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
8. Berns H., Escher C., Streich W.D. Martensitic high nitrogen steel for applications at elevated temperature. *Materials science forum*. Trans Tech Publications Ltd, 1999, vol. 318, pp. 443–448.
9. Berns H., Ehrhardt R. Carbon or nitrogen alloyed quenched and tempered stainless steel – comparative study. *Steel research* 67. 1996, no. 8, pp. 343–349.
10. Stein G., Hucklenbroich I., Wagner M. P 2000-A new austenitic high nitrogen steel for power generating equipment. *Materials science forum*. Trans Tech Publications Ltd, 1999, vol. 318, pp. 167–174.
11. 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: December 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
12. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V. et al. Tensile Fracture of Austenitic Corrosion-Resistant Steels with an Overequilibrium Nitrogen Content and Various Vanadium Contents. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, is. 10, pp. 1265–1269. DOI: 10.1134/S0036029521100062.
13. Sevalnev G.S., Antsyferova M.V., Dulnev K.V., Sevalneva T.G., Vlasov I.I. Influence of nitrogen concentration on the structure and properties of sparingly alloyed structural steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
14. Bannykh I.O., Bannykh O.A., Antsyferova M.V. Substantiation of the choice of composition and smelting of medium-carbon low-alloyed deformation-hardened nitrogen-containing steel under conditions of electroslag remelting at elevated nitrogen pressure. *Elektrometallurgiya*, 2018, no. 5, pp. 24–29.
15. Goncharevskaya D.A. Chemical-thermal treatment of steels with superequilibrium nitrogen concentration. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal MGTU im. N.E. Bauman*, 2020, no. 8 (49), art. 05. Available: <http://ptsj.ru> (accessed: December 21, 2021). DOI: 10.18698/2541-8009-2020-08-636.
16. Goncharevskaya D.A. Mass transfer of nitrogen and carbon in steel with superequilibrium nitrogen concentration under diffusion saturation. *Future of mechanical engineering of Russia*. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 2020, pp. 117–120.
17. Blinov V.M., Lukin E.I., Blinov E.V., Samoilova M.A. Features of tensile failure of welded joints of high-nitrogen austenitic steel 05Kh22AG16N8M with different nitrogen content. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2021, no. 3, pp. 24–29.
18. Blinov V.M., Kostina M.V., Lukin E.I. et al. Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of low-alloy steel 10Kh3A with superequilibrium nitrogen content. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2019, no. 7, pp. 38–41.
19. Bakradze M.M., Voznesenskaya N.M., Leonov A.V., Krylov S.A., Tonysheva O.A. Development and research of high-strength corrosion-resistant steel for bearing parts. *Metallurg*, 2019, no. 11, pp. 39–44.
20. *High-strength corrosion-resistant steel*: pat. 2724766 Rus. Federation, no. 2019115908; filed 23.05.19; publ. 25.06.20.

21. Komarov O.S., Kovalevsky V.N., Kerzhentseva L.F. *Materials Science and Technology of Structural Materials*. Ed. O.S. Komarov. 3rd ed., rev. and add. Minsk: New knowledge, 2009, 671 p.
22. Golovnya V.G. *Technology of radio equipment parts*. Moscow: Radio and communication, 1983, 296 p.
23. Radyuchenko Yu.S. *Rotary forging*. Moscow: Mashgiz, 1962, 186 p.

Информация об авторах

Моисеенков Валерий Викторович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севальнев Герман Сергеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Волков Роман Борисович, генеральный директор, ОАО «ОК-Лоза», okloza@okloza.ru

Дульнев Константин Владимирович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Левин Евгений Александрович, генеральный директор, ООО «НПК «Спецсталь», sim@st-steel.ru

Information about the authors

Valerii V. Moiseenkov, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Roman B. Volkov, Director General, OK-Loza OJSC, okloza@okloza.ru

Konstatntin V. Dulnev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeniy A. Levin, Director General, LLC «RPC «Spetsstal», sim@st-steel.ru

Статья поступила в редакцию 18.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.02.2022.

The article was submitted 18.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 28.02.2022.

Научная статья

УДК 669.017

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-16-24

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКА ПРИПОЯ ВПр28 НА ОСНОВЕ ТИТАНА НА ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ ПОРОШКОВ (обзор)

А.В. Свиридов¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, И.А. Галушка¹

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

Аннотация. Представлены сведения об основных методах изготовления порошка припоя ВПр28 на основе титана, таких как гидридно-кальциевое восстановление оксидов, переработка аморфных полуфабрикатов, дробление литых полуфабрикатов, распыление расплава инертным газом. Рассмотрены особенности технологий и их влияние на порошки припоев, полученные разными методами. Представлены результаты сравнительных исследований технологических характеристик и содержания вредных примесей таких порошков.

Ключевые слова: пайка, высокотемпературная пайка, титановые припой, металлопорошковые композиции, газовая атомизация, аморфные ленты

Для цитирования: Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Влияние технологий изготовления порошка припоя ВПр28 на основе титана на особенности полученных порошков (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 02. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-16-24.

Scientific article

INFLUENCE OF MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF BRAZING ALLOY POWDER VPr28 ON POWDER FEATURES (review)

A.V. Sviridov¹, A.N. Afansiev-Khodykin¹, I.A. Galushka¹

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 information about main methods of manufacturing titanium-based VPr28 solder powder, such as calcium hydride reduction of oxides, processing of amorphous semi-finished products, crushing of cast semi-finished products, spraying the melt with an inert gas. Technological features and influence on brazing alloy powder, obtained by different methods was considered. Results of comparative research of technical characteristics and the maintenance of harmful impurity of such powders was showed

Keywords: brazing, high-temperature brazing, titan based brazing alloy, metal-powder compositions, gas atomization, amorphous tapes

For citation: Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Influence of manufacturing technologies of brazing alloy powder VPr28 on powder features (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 02. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-16-24.

Введение

Припой на основе титана (ВПр16 и ВПр28) уже давно нашли широкое применение в различных отраслях промышленности при изготовлении деталей из различных титановых сплавов [1–4]. К таким деталям относятся рабочие колеса центробежных компрессоров, диффузоры, направляющие и спрямляющие аппараты, теплообменники, трубопроводы, сотовые конструкционные, шумоглушающие панели и т. д. В настоящее время используют множество технологий изготовления порошков припоев ВПр16 и ВПр28, однако ввиду высокой активности титана оптимальная технология их получения так и не определена [5, 6].

В данной статье приведены основные технологии изготовления припоев на основе титана на примере припоя ВПр28, которые нашли наиболее широкое применение в промышленности, их особенности и влияние на получаемый припой.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.9. «Припои и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами для формирования оптимальной структуры паяного соединения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [7].

Технология гидридно-кальциевого восстановления оксидов

При изготовлении припоев по данной технологии оксиды исходных металлов (титан, никель и цирконий) в виде порошков перемешиваются с гидридом кальция в заданных соотношениях. После этого проводят термическую обработку полученной смеси, в процессе которой оксиды металлов восстанавливаются, а металлы сплавляются между собой, образуя титан-цирконий-никелевую лигатуру. В дальнейшем полученную лигатуру измельчают и смешивают с порошком меди. Следует отметить, что введение оксидов меди в состав шихты нецелесообразно. Это связано с реакцией при взаимодействии меди с кальцием, которая приводит к нестабильности получаемого состава порошка припоя.

Данный метод относительно легко реализуется, не требует использования сложного оборудования и может обеспечить высокую производительность. Однако порошки припоев, полученные по технологии гидридно-кальциевого восстановления оксидов, не отличаются высоким качеством и стабильностью технологических характеристик.

В процессе нагрева порошка припоя ВПр28 под пайку благодаря контактному плавлению лигатуры с медью происходит их активное взаимодействие, нередко сопровождающееся разбрызгиванием припоя.

Еще одной проблемой, возникающей при изготовлении порошка гидридно-кальциевым восстановлением оксидов, является его соответствие химическому составу. Для того чтобы состав расплавленного припоя на детали отвечал заданному, необходимо, чтобы дозировка припоя обеспечивала одинаковый состав образовавшейся жидкости по всему его объему. Если же частицы имеют разный состав, то для каждого припоя должен существовать определенный объем, зависящий от количества первоначально находившихся в нем частиц припоя. При меньшем объеме возникает вероятность того, что состав материала будет отличаться от заданного. Такое положение существенно ограничивает возможности дозировки припоя. Например, фольга из смеси прокатанных порошков припоя ВПр28 может иметь толщину 0,1 мм, однако исследования показывают, что только при толщине фольги $>0,4$ мм расплавленный припой после затвердевания будет иметь ровную, гладкую поверхность, что свидетельствует о равномерном составе расплавленного припоя.

Форма частиц порошка припоя ВПр28, полученного данным методом, преимущественно неправильная и напоминает куски губчатого титана. Как показывают исследования, из-за нестабильности качества порошков оксидов и особенностей технологии изготовления порошок припоя ВПр28, полученный гидридно-кальциевым восстановлением оксидов, может содержать в своем составе примеси следующих элементов, % (по массе): кремний – до 0,2; железо – до 0,6; кальций – до 0,1. Следует отметить, что порошок меди в припое находится в свободном состоянии и при неблагоприятных условиях хранения может окисляться и образовывать гидроксид меди.

Технология размола литых заготовок

По данной технологии выплавляются слитки, которые потом подвергают дроблению и размолу. Кроме того, такой метод также не требует использования сложного оборудования, но ввиду высокой трудоемкости дробления и размола не обеспечивает высокой производительности. Однако порошки припоев, полученные по технологии размола литых заготовок, обладают высоким качеством и стабильностью технологических характеристик.

Для выплавки титановых сплавов в основном используются вакуумные дуговые печи с медным кристаллизатором, в который по мере расплавления шихты или слитка меньшего диаметра опускают затвердевающую часть слитка. Затвердевающий расплав на поверхности медного кристаллизатора (гарнисаж) выполняет функцию тигля для остального расплава. Вследствие низкой температуры плавления и относительно небольшой усадки при затвердевании слитков припоя ВПр28 зачастую заклинивает в кристаллизаторе, что приводит к невозможности его извлечения без разрушения отливки и/или кристаллизатора. Поэтому выплавку таких слитков осуществляют в дуговых печах с чашеобразной полостью в кристаллизаторе. Шихта припоя размещается на медном водоохлаждаемом поддоне. Плавка производится в разряженном аргоне на постоянном токе. Анодом является вольфрамовый электрод, катодом – шихта. Режим выплавки подбирают таким образом, чтобы вся поверхность слитка при выплавке находилась в жидком состоянии. При выключении тока дуги происходит затвердевание слитка. Кристаллизация начинается от медного поддона, затем переходит к внешней поверхности слитка и заканчивается в середине слитка – в том месте, где был отключен дуговой разряд. После выплавки слиток извлекают из кристаллизатора, переворачивают и снова переплавляют. Для равномерности переплава слиток переворачивают не менее 5 раз – в зависимости от массы плавки. Данный метод выплавки используют для получения слитков небольшой массы ~ (1–2) кг. Недостатком такого способа является наличие в процессе выплавки аргона, который может содержать в своем составе воду, кислород и азот. В результате припой ВПр28 в силу своей активности может насыщаться данными примесями.

Другим способом выплавки слитков припоя ВПр28 является выплавка в вакуумной индукционной печи с применением графитового тигля. По границе расплава с графитовым тиглем образуется прослойка карбида титана, имеющего высокую температуру плавления. Растворение углерода в расплаве титана контролируется диффузией углерода через эту прослойку карбида. При достаточно большой толщине прослойки и невысокой температуре, при которой происходит взаимодействие расплава с тиглем, растворение углерода в расплаве незначительное. Тем более это справедливо для выплавки припоя ВПр28, температура плавления которого не превышает 900 °С. После выплавки расплав разливают в медные или графитовые кокили заданных формы и размера. Такой способ значительно более производительный и позволяет получать литые заготовки массой 5–15 кг. Отсутствие атмосферы при

выплавке и минимальное взаимодействие расплава с тиглем при правильно подобранных технологических параметрах выплавки обеспечивают минимальное количество примесей в литых заготовках припоя ВПр28.

На рис. 1 представлены микроструктуры слитков, полученных разными методами выплавки.

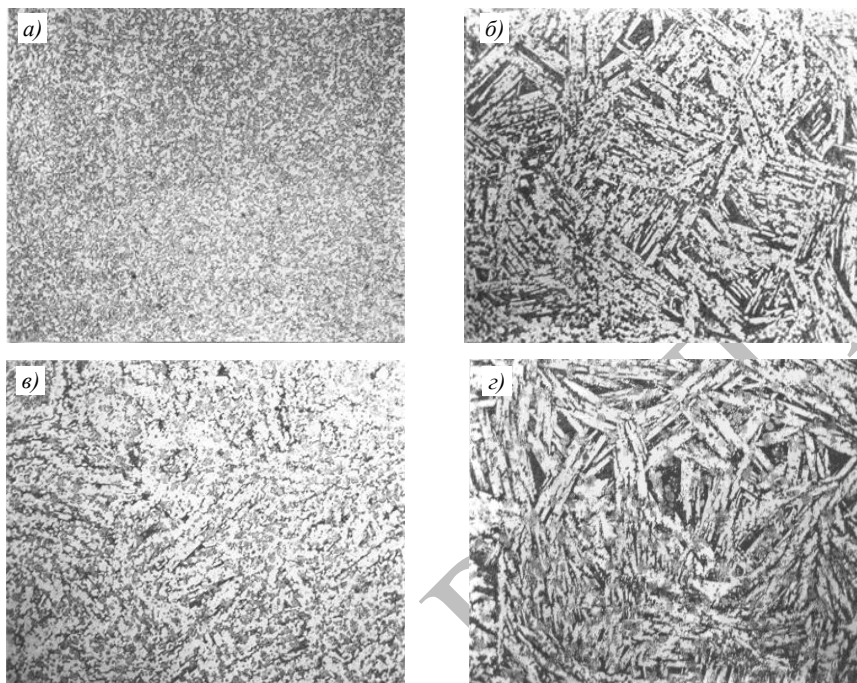


Рис. 1. Микроструктуры ($\times 100$) периферической (а, в) и средней (б, г) частей слитка припоя ВПр28, полученного вакуумно-индукционной (а, б) и дуговой выплавкой (в, г)

Микроструктура припоя ВПр28 представляет собой эвтектику из первичных зерен твердого раствора на основе титана и сложного интерметаллида титана и циркония с медью и никелем. Первичный твердый раствор на основе титана при охлаждении до комнатной температуры претерпевает эвтектоидное превращение с выпадением очень мелких интерметаллидов титана и циркония с медью и никелем. Таким образом, содержание интерметаллидов в припое при комнатной температуре составляет $\sim 60\%$ (объемн.). На рис. 1 такие интерметаллиды более светлые. При сравнении структур по краям и в середине слитка (рис. 1, а, б) видно, что первичные интерметаллиды в середине слитка более крупные и сформировались при более низкой скорости затвердевания.

По микроструктуре слитка, полученного методом дуговой выплавки на медном поддоне (рис. 1, в, г), видно, что выделения первичных интерметаллидов значительно более грубые, чем у слитка, полученного индукционной выплавкой. Средний размер интерметаллидов в слитке, полученном методом индукционной выплавки, составляет 20 мкм, а в слитке, полученном методом дуговой выплавки, 40 мкм.

Для минимизации энергозатрат при размоле размер интерметаллидных включений должен быть минимальным, поэтому вакуумно-индукционная выплавка из-за высокой скорости охлаждения является более предпочтительной.

После выплавки слитки подвергаются дроблению и размолу. Для снижения трудоемкости и повышения производительности перед измельчением их могут подвергать гидрированию с последующим дегидрированием готового порошка.

В порошке припоя, полученном данным методом, частицы имеют преимущественно компактную равноосную форму. Кроме того, порошок может содержать в своем составе дополнительно примеси, образовавшиеся в результате намола материала мелющих тел, используемых при его дроблении и размоле, в частности железа. Однако в отличие от порошка припоя, полученного методом гидридно-кальциевого восстановления оксидов, данная примесь легко удаляется из порошка методом магнитной сепарации, поскольку в этом случае железо не растворено в припое, а находится на поверхности частиц порошка, сохраняя свои ферромагнитные свойства. Порошок припоя при таком методе изготовления имеет единый равномерный химический состав всех частиц и не склонен к окислению в процессе хранения.

Технология переработки аморфных полуфабрикатов

Данная технология является частным случаем технологии размола литых заготовок. Отличие заключается в том, что после выплавки шихтовых заготовок из них изготавливают аморфную (микрокристаллическую) ленту толщиной 20–40 мкм или волокно эквивалентным диаметром 40–100 мкм [8–10]. Изготовление аморфных лент проводят разливкой расплава припоя из кварцевого тигля с прорезью на быстро вращающийся медный диск с широкой кромкой. Волокна припоя получают методом экстракции висящей капли расплава с использованием медного диска с узкой кромкой (рис. 2). Оба метода обеспечивают получение заготовок небольшой толщины с очень малым размером зерна, обусловленного высокой скоростью кристаллизации (10^3 – 10^6 К/с). В дальнейшем аморфные (микрокристаллические) полуфабрикаты подвергают отжигу для охрупчивания и размалывают.

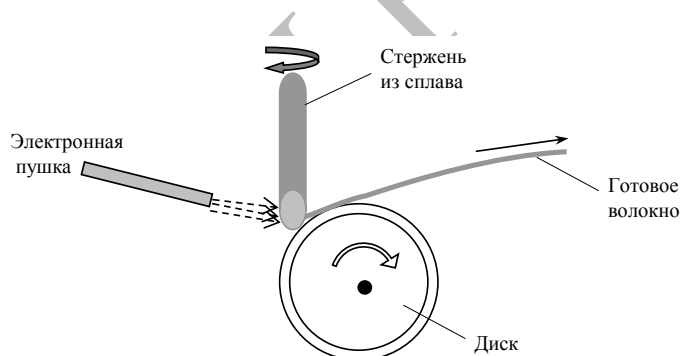


Рис. 2. Схема получения волокон припоя методом экстракции висящей капли расплава

Данные методы позволяют значительно сократить продолжительность размола и трудозатраты на него. Однако это преимущество нивелируется высокой сложностью изготовления самих аморфных (микрокристаллических) полуфабрикатов. Порошок припоя имеет частицы неправильной формы со значительной разницей по величине взаимно перпендикулярных размеров. При размоле аморфных лент форма частиц преимущественно чешуйчатая, а при размоле волокон – цилиндрическая. Порошок припоя ВПр28, изготовленный по данной технологии, обычно содержит в своем составе дополнительное количество кислорода, которым насыщается в процессе получения аморфных полуфабрикатов.

Технология распыления расплава

Существуют три основных способа изготовления металлических порошков распылением расплава: центробежное распыление в вакууме, тигельное и бестигельное газоструйное распыление струи расплава [11–15].

Технологию центробежного распыления в вакууме не применяют для припоя ВПр28 в силу технологических особенностей данного метода. При изготовлении заготовку распыляемого материала в виде цилиндрического слитка раскручивают до скорости 5–15 тыс. об/мин при одновременном воздействии на торец слитка дуги плазмотрона. На торце слитка образуется расплав, который под действием центробежных сил отрывается от слитка и разбивается на мелкие капли. Полученные капли расплавленного металла затвердевают в полете до соударения со стенками камеры распыления и ссыпаются в виде отдельных частиц в приемный бункер. Припой ВПр28 в литом состоянии очень хрупкий и при вращении со столь большими скоростями из-за наличия в своем составе литейных дефектов раскалывается, повреждая отлетевшими кусками детали установки. К тому же такой припой не обладает высокой технологичностью литья, что превращает получение бездефектных отливок диаметром 50–100 мм и длиной >500 мм в сложную задачу.

При тигельном распылении расплава инертным газом шихтовая заготовка припоя расплавляется в тигле, после чего струя расплава направляется в форсунку, где в результате воздействия интенсивного газового потока разбивается на отдельные частички, которые кристаллизуются в полете и собираются в приемном бункере в виде готового порошка. Данная технология, используемая при изготовлении порошка припоя ВПр28, также имеет недостатки. Основная сложность при применении тигельного газоструйного распыления расплава заключается в высокой активности припоя ВПр28 и его способности взаимодействовать с керамическими материалами на основе оксидов магния и алюминия, из которых в основном и изготавливают детали установок по распылению расплава (тигель, промежуточный ковш, металлопровод, стопор и др.). Решением данной проблемы является изготовление всех деталей, контактирующих с расплавом, из керамики, стойкой к расплавам титана, на основе оксидов циркония и иттрия. Однако такие керамические детали имеют высокую стоимость и относительно малый ресурс из-за склонности к образованию трещин при резких теплосменах, неизбежных при распылении.

При бестигельном газоструйном распылении струи расплава нижний конец цилиндрического слитка, расположенного вертикально, оплавляется индукционным нагревом или дугой плазмотрона. Образовавшаяся жидкость капает со слитка и попадает в зону действия форсунки, где в результате воздействия интенсивного газового потока разбивается на отдельные частички, которые кристаллизуются в полете и собираются в приемном бункере в виде готового порошка. Недостатком данного способа также является невысокая литейная технологичность припоя ВПр28, затрудняющая получение качественных слитков большого размера (диаметром 50–100 мм и длиной >500 мм).

Оба метода газоструйного распыления расплава обладают высокой производительностью и обеспечивают получение чистого порошка припоя с минимальным уровнем примесей. Использование бестигельного метода распыления расплава при изготовлении порошков способствует повышению производительности и снижению стоимости расходных материалов, однако из-за неравномерной подачи металла в распыляющую форсунку образуются порошки припоя с более широким интервалом фракционного состава, что несколько уменьшает выход годного.

Порошок припоя, полученный методом распыления расплава, имеет преимущественно сферическую форму частиц. В процессе распыления в порошке немного повышается содержание кислорода в результате взаимодействия расплава с кислородом, неизбежно содержащимся в аргоне (распыляющем газе). Остальные примеси остаются на уровне содержания в шихтовой заготовке. Порошок припоя при

данном методе изготовления имеет единый равномерный химический состав всех частиц и не склонен к окислению в процессе хранения.

Опробование

Для сравнительной оценки качества порошков припоя ВПр28, полученных разными методами, проведены определение содержания кислорода и оценка технологических характеристик. Для исследований использовали порошок припоя с размером частиц 0–200 мкм. Оценку технологических характеристик выполняли по следующей методике. В центр шлифованной пластины из сплава ВТ1-0 размером 30×30×2 мм укладывали навеску порошка припоя и фиксировали при помощи 3 %-ного раствора сополимера акриловой смолы БМК-5 в ацетоне. Пайку образцов проводили в вакуумной печи сопротивления при температуре 880 °С. Результаты сравнительной оценки содержания кислорода в порошке и технологических характеристик припоя ВПр28, полученного различными методами, представлены в таблице.

Содержание кислорода и технологические характеристики порошка припоя ВПр28, полученного разными методами

Метод изготовления	Содержание кислорода, % (по массе)	Площадь растекания, мм ²	Угол смачивания, градус
Гидридно-кальциевое восстановление оксидов	0,22	150–175	12–18
Размол литых заготовок (индукционная выплавка)	0,09	200–220	10–15
Переработка аморфных полуфабрикатов	0,12	195–220	11–16
Распыление расплава	0,11	200–215	10–14

Из данных, представленных в таблице, видно, что практически все методы, за исключением гидридно-кальциевого восстановления, обеспечивают получение порошка припоя ВПр28 с приблизительно одинаковым низким уровнем содержания кислорода и высокими показателями технологических характеристик. Порошок припоя, изготовленный гидридно-кальциевым восстановлением оксидов, содержит в своем составе почти в 2 раза больше кислорода и обладает более низкими технологическими характеристиками. Такой уровень характеристик, по-видимому, вызван повышением температуры плавления припоя благодаря более высокому содержанию кислорода и вследствие сложности процесса контактно-реактивного сплавления в процессе пайки.

Заключения

Сравнительный анализ различных методов получения порошка показал, что все представленные в работе методы обеспечивают изготовление порошка припоя ВПр28, удовлетворяющего требованиям действующей нормативной документации.

Использование метода гидридно-кальциевого восстановления характеризуется низким уровнем затрат и высокой производительностью, кроме того, для его применения не требуется специального дорогостоящего оборудования. Получаемый таким методом порошок припоя имеет повышенный уровень примесей (O, Ca, Si, Fe), снижающих технологические характеристики припоя.

Остальные методы изготовления лишены этого недостатка, однако требуют специализированного оборудования и имеют меньшую производительность.

Список источников

1. Рыльников В.С., Лукин В.И. Припой, применяемые для пайки материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2013. № 8. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021).
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность». Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 79–87.
4. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование структуры и свойств жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана с микродобавками гадолиния // Материаловедение. 2017. № 3. С. 3–10.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. 2013. № 10. С. 23–32.
6. Макушина М.А., Кочетков А.С., Ночовная Н.А. Литейные титановые сплавы для авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
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. Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Любарского. М.: Металлургия, 1987. 582 с.
9. Немошкаленко В.А., Романова А.В., Ильинский А.Г. и др. Аморфные металлические сплавы. Киев: Наукова думка, 1987. 248 с.
10. Anthony R.T., Cline H.E. Dimensional variations in Newtonian – quenched metal ribbons formed by melt spinning and melt extraction // Journal of Applied Physics. 1979. Vol. 50. No. 1. P. 245–254.
11. Митин Б.С., Васильев В.А. Порошковая металлургия аморфных и микрокристаллических материалов. М.: Металлургия, 1992. 128 с.
12. Алишин М.И., Князев А.Е. Производство металлопорошковых композиций высокой чистоты титановых сплавов методом индукционной газовой атомизации для аддитивных технологий // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5.
13. Князев А.Е., Неруш С.В., Алишин М.И., Куко И.С. Исследования технологических свойств металлопорошковых композиций титановых сплавов BT6 и BT20, полученных методом индукционной плавки и газовой атомизации // Труды ВИАМ. 2017. № 11 (59). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
14. Волков А.М., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2018. № 11 (71). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
15. Яцюк И.В., Артеменко Н.И., Доронин О.Н., Неруш С.В. Применение технологии газовой атомизации для получения высококачественных металлопорошковых композиций для нанесения атмосферно-плазменных покрытий // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-3-9.

References

1. Ryl'nikov V.S., Lukin V.I. Solder used for soldering materials aviation applications. *Trudy VIAM*, 2013, no. 8, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 09, 2021).
2. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Welding and soldering in the aerospace industry. *All-Rus. Scientific-Practical Conf. "Welding and Safety"*. Yakutsk: IFTPS SB RAS, 2012, pp. 21–30.

3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ryl'nikov V.S., Afanasiev-Khodykin A.N. Investigation of fine-dispersed solder powders for diffusion vacuum soldering, obtained by melt atomization. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman*, Ser.: Mashinostroyeniye, 2011, no. SP2, pp. 79–87.
4. Kablov E.N., Nochovnaya N.A., Panin P.V., Alekseev E.B., Novak A.V. Investigation of the structure and properties of heat-resistant alloys based on titanium aluminides with gadolinium microadditives. *Materialovedeniye*, 2017, no. 3, pp. 3–10.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Strategic directions for the development of structural materials and technologies for their processing for aircraft engines of the present and future. *Avtomaticheskaya svarka*, 2013, no. 10, pp. 23–32.
6. Makushina M.A., Kochetkov A.S., Nochovnaya N.A. Cast titanium alloys for aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-39-47.
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. *Amorphous metal alloys*. Ed. F.E. Lyubarsky. Moscow: Metallurgiya, 1987, 582 p.
9. Nemoshkalenko V.A., Romanova A.V., Ilyinsky A.G. et al. *Amorphous metal alloys*. Kyiv: Naukova Dumka, 1987, 248 p.
10. Anthony R.T., Cline H.E. Dimensional variations in Newtonian – quenched metal ribbons formed by melt spinning and melt extraction. *Journal of Applied Physics*, 1979, vol. 50, no. 1, pp. 245–254.
11. Mitin B.S., Vasiliev V.A. *Powder metallurgy of amorphous and microcrystalline materials*. Moscow: Metallurgiya, 1992, 128 p.
12. Alishin M.I., Knyazev A.E. Production of metal-powder high-purity titanium alloy compositions by induction gas atomization for application in additive manufacturing. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-5-5.
13. Knyazev A. E., Nerush S.V., Alishin M.I., Kuko I.S. Researches of the technological properties of metal-powder compositions of VT6 and VT20 titanium alloys obtained by induction melting and gas atomization. *Trudy VIAM*, 2017, no. 11 (59), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-6-6.
14. Volkov A.M., Shestakova A.A., Bakradze M.M. The comparison of powder produced by gas atomization and by plasma rotate electrode process in the point of production disk billets from ni-base superalloys. *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
15. Iatsyuk I.V., Artemenko N.I., Doronin O.N., Nerush S.V. Application of gas atomization technology to obtain high-quality metal powder compositions for applying atmospheric plasma coatings. *Trudy VIAM*, 2020, no 2 (86), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 9, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-3-9.

Информация об авторах

Свиридов Александр Владимирович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Афанасьев-Ходыкин Александр Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Галушка Игорь Александрович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander V. Sviridov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander N. Afansiev-Khodykin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor A. Galushka, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.01.2022.
The article was submitted 22.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 17.01.2022.

Научная статья

УДК 669.018.292

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35

ЖИВУЧЕСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ФЮЗЕЛЯЖА ИЗ АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В-1469

М.Д. Пантелеев¹, А.В. Свиридов¹, А.А. Скупов¹, Н.С. Одинцов¹

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

Аннотация. Проведены исследования статических и усталостных характеристик сварных соединений высокопрочного алюминиевого сплава В-1469. Проведены механические и ресурсные испытания плоских сварных конструктивно-подобных образцов (КПО) элементов фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава В-1469, выполненных лазерной сваркой и сваркой трением с перемешиванием. Оценку живучести сварных соединений проводили с нанесенными концентраторами напряжений. Сравнительная оценка циклической долговечности до разрушения на сварных КПО, выполненных с надрезом и без него, показала значительное снижение значений малоциклового усталости, что указывает на высокую чувствительность сварных соединений из алюминий-литиевого сплава В-1469 к концентраторам напряжений.

Ключевые слова: лазерная сварка, панель фюзеляжа, алюминиевый сплав, алюминий-литиевый сплав, микроструктура, механические свойства

Для цитирования: Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Живучесть сварных конструкций элементов фюзеляжа из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 03. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.

Scientific article

ALUMINUM-LITHIUM ALLOY V-1469 WELDED FUSELAGE CONSTRUCTIONS SURVIVABILITY

M.D. Panteleev¹, A.V. Sviridov¹, A.A. Skupov¹, N.S. Odintsov¹

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 static and fatigue characteristics of welded joints of high-strength aluminum alloy B-1469 have been explored. Mechanical and service-life tests of flat welded structurally similar samples of fuselage elements made of aluminum-lithium alloy V-1469 performed by laser-beam welding and friction stir welding have been carried out. The survivability of welded joints was evaluated with introduced stress concentrators. A comparative assessment of the cyclic durability to failure on welded structurally similar samples made with and without incision showed that the values of the low-cycle fatigue were significantly reduced, which indicate a high sensitivity of welded joints made of aluminum-lithium alloy V-1469 to stress concentrators.

Keywords: laser welding, fuselage panel, aluminum alloy, aluminum-lithium alloy, microstructure, mechanical properties

For citation: Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Aluminum-Lithium alloy V-1469 welded fuselage constructions survivability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 03. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.

Введение

Возрастающие требования к надежности, ресурсу и весовой эффективности конструкций авиационной и космической техники стимулируют совершенствование композиций алюминиевых сплавов для получения оптимального соотношения физико-механических свойств и характеристик технологичности. Помимо этого, в современной авиационной промышленности одной из сложнейших задач в процессе разработки элементов фюзеляжа пассажирских самолетов, решить которую в настоящее время не представляется возможным, является снижение массы изделия при уменьшении себестоимости его изготовления без создания и внедрения новых перспективных материалов [1–6].

Компания Airbus первой предложила стратегическое решение вопроса повышения весовой эффективности путем введения сварки лазерным лучом для элементов фюзеляжа. В последнее время этот вид сварки активно и успешно используется при изготовлении панелей нижней части фюзеляжа (рис. 1, а). В данной работе стрингер приваривался к обшивке панели (рис. 1, б). Это существенно снизило массу конструкции и увеличило топливную эффективность. Такие производители авиационной техники, как компании Airbus и Boeing, уже приступили к внедрению современных способов сварки при изготовлении конструкции фюзеляжа (рис. 1). Применение данной технологии позволило снизить массу самолета A380 на 15 %, что, в свою очередь, привело к уменьшению расхода топлива на 1,45 % на каждую тонну массы летательного аппарата [7].

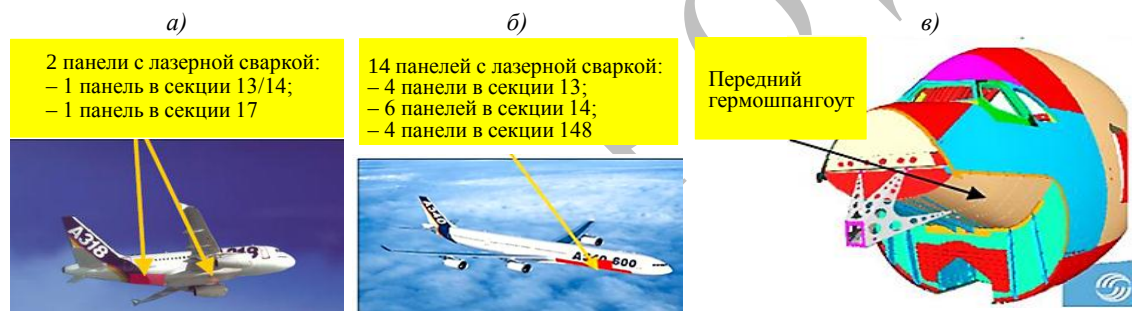


Рис. 1. Применение панелей, выполненных лазерной сваркой, в конструкциях современных воздушных судов компании Airbus, таких как A318 (а), A340-500/-600 (б) и A380 (в)

Так, в самолете A318 компании Airbus при помощи сварки сделано всего две панели, расположенные в наименее нагруженных зонах фюзеляжа, а для самолета A340 применено и изготовлено 14 панелей.

Здесь важно отметить осторожность и последовательность специалистов французской компании Airbus в процессе внедрения сварки лазерным источником энергии в конструкции фюзеляжа, так как для оценки работоспособности сварных конструкций необходимо получить положительный опыт их эксплуатации. Это обусловлено тем, что с точки зрения безопасной эксплуатации сварных конструкций возможно возникновение разрушения под действием напряжений, максимальная величина которых существенно меньше предела текучести, так как сварной шов представляет собой значительный концентратор напряжений, который может спровоцировать усталостное разрушение конструкции [8]. Это явление необходимо учитывать и сводить возможность такого разрушения к минимуму на этапе проектирования конструкций.

Поэтому научный и практический интерес представляет исследование влияния различных концентраторов напряжений в сварных соединениях на их ресурсные характеристики, поскольку в большинстве случаев усталостное разрушение возникает именно в местах концентрации напряжений. Актуальность этой задачи дополнительно подтверждается тем, что высокопрочные алюминиевые сплавы обладают высокой чувствительностью к концентрации напряжений в области малого разрушающего числа циклов [9].

Решение поставленной ранее задачи также возможно благодаря перспективной технологии сварки трением с перемешиванием. Этот процесс обеспечивает многочисленные преимущества, например, такие как малые деформации после сварки и высокую прочность соединения. Широкие возможности этого способа сварки существенно упрощают технологию сборки, обеспечивают отсутствие жестких требований к подготовке поверхности перед сваркой, позволяют повысить уровень автоматизации процесса и снизить массу сварной конструкции благодаря замене нахлесточного соединения стыковым [10–13].

Специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан ряд технологий лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов, которые позволяют использовать их в сварных конструкциях фюзеляжа современных изделий авиационной отрасли [14–16].

Важнейшие преимущества этого вида сварки в отличие от клепки: сокращение производственных расходов, практически полное отсутствие деформации, кристаллизация сварочной ванны с большими скоростями (образование мелкозернистой структуры в шве), минимизация зоны термического воздействия – обеспечили возможность внедрения ее в конструкцию фюзеляжа. Для сплавов системы Al–Cu–Li целесообразно применение присадочных материалов с редкоземельными металлами, что позволяет не только модифицировать структуру сварного шва, но и увеличить площадь его поперечного сечения, улучшая их механические свойства. Поэтому выбор состава присадочного материала, который сможет улучшить свариваемость перспективных сплавов, является весьма актуальной задачей [17–19].

Материалы и методы

В данной работе проведены исследования сварных соединений листовых заготовок толщиной 1,5 мм из сплава В-1469 на алюминий-литиевой основе. Соединения выполняли по отработанным режимам на комплексах лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием. Полученные сварные конструктивно-подобные образцы (КПО) из сплава В-1469 испытаны на механические (ударная вязкость KCU – по ГОСТ 6996–66) и ресурсные (малоцикловая усталость – по ГОСТ 25.502–79) характеристики, а также исследованы их микро- и макроструктуры. Выбраны режимы подварки (второго прохода) лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием для ремонта стыковых соединений. Выбранные режимы лазерной сварки обеспечивали формирование шва в соответствии с ГОСТ EN 4678–2016 и отсутствие недопустимых дефектов по ГОСТ ISO 13919-2–2017. В качестве материала присадки выбрана проволока Св-1201 диаметром 1,2 мм.

Исследование живучести сварных соединений (т. е. усталостной долговечности с нанесенным и регламентированным концентратором напряжений) высокопрочного алюминиевого сплава В-1469 проводили на образцах сварных соединений размером 100×340 мм с зачищенным проплавом и усилением.

На основе существующей конструкции фюзеляжа самолета SSJ-100 совместно с конструкторами ПАО «Корпорация «Иркут» – филиал «Региональные самолеты» разработаны чертежи плоских сварных КПО элементов фюзеляжа, предназначенных для статических и усталостных испытаний в подтверждение возможности безопасного применения сварных конструкций в элементах фюзеляжа гражданского самолета. Анализ конструкции фюзеляжа позволил выбрать элементы, для которых клепаное соединение можно заменить на сварное (крепление стрингера к обшивке на панелях фюзеляжа), а также определить размеры и расположение надразов (концентраторов напряжений) на сварных швах КПО для оценки живучести (остаточной циклической долговечности до разрушения) сварной конструкции. В качестве концентраторов напряжений нанесены надразы (в том числе совмещенные с отверстием) в металле шва и околошовной зоне (рис. 2).

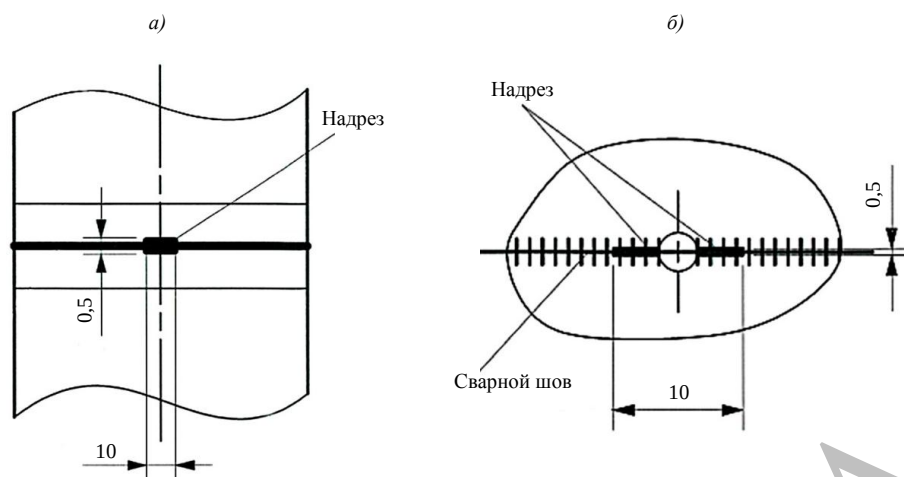


Рис. 2. Схема расположения концентраторов напряжений на конструктивно-подобном образце: а – надрез; б – надрез с отверстием диаметром 3 мм

Со сварного шва КПО механическим способом удаляли проплав и усиление с целью уменьшить влияние различной геометрической формы сварных швов, выполненных лазерной сваркой и сваркой трением с перемешиванием, а также для того, чтобы сделать результаты испытаний двух способов сварки более сравнимыми (рис. 3) [18, 19].



Рис. 3. Сварные конструктивно-подобные образцы, выполненные лазерной сваркой (а) и сваркой трением с перемешиванием (б)

Проведено исследование влияния режимов лазерной сварки и подварки тавровых сварных соединений алюминий-литиевого сплава В-1469 на структуру, механические и ресурсные (малоцикловая усталость) характеристики. Сварку проводили в специальной оснастке, обеспечивающей закрепление заготовок для сварки под углом 45 градусов (рис. 4).

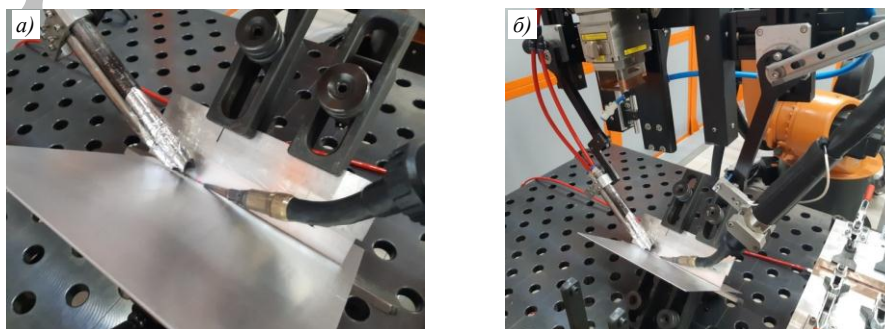


Рис. 4. Закрепленная в оснастке заготовка (а) для проведения лазерной сварки тавровых соединений на роботизированном комплексе (б)

Исследованы диапазоны технологических параметров, обеспечивающих отсутствие сварочных дефектов и формирование шва в соответствии с ГОСТ ISO 13919-2–2017; лазерную сварку проводили в импульсном режиме.

Результаты и обсуждение

Исследованы механические свойства материала при комнатной температуре на плоских КПО из сплава В-1469, изготовленных с помощью лазерной сварки и сварки трением с перемешиванием. После определения прочности при растяжении можно утверждать, что повторный (имитирующий ремонтный вариант) проход лазером на стыковых сварных КПО снижает значения прочности с 335 до 265 МПа, что сопоставимо с результатами, полученными на нахлесточных образцах КПО, выполненных сваркой трением с перемешиванием с двумя проходами, где соединение работает на срез (табл. 1).

Таблица 1

Уровень прочности (средние значения) различных типов соединений

Вид сварки	Тип соединения	Предел прочности при растяжении, МПа	
		после одного прохода*	после двух проходов (ремонтный вариант)
Лазерная	Встык	335	265
Трением с перемешиванием	Встык	405	330
	Внахлест	260	255

* Средние значения по результатам испытаний элементарных образцов.

Повторный проход стыковых КПО, выполненных сваркой трением с перемешиванием, снижает прочность с 405 до 330 МПа. Отмечено, что остаточная прочность стыкового соединения, выполненного двумя проходами сваркой трением с перемешиванием, на 25 % больше, чем у аналогичного соединения, полученного методом лазерной сварки. Данные по снижению прочностных характеристик после повторного прохода необходимы для оценки запаса прочности сварных конструкций элементов планера в процессе их проектирования.

Результаты ресурсных испытаний плоских сварных КПО элементов фюзеляжа, выполненных лазерной сваркой и сваркой трением с перемешиванием, представлены в табл. 2.

Сравнительная оценка циклической долговечности до разрушения на сварных КПО, выполненных с надрезом и без него, показала снижение на порядок значений малоциклового усталости, что указывает на высокую чувствительность сварных соединений из данного сплава к концентраторам напряжений. Отверстие в надрезе КПО, сваренных трением с перемешиванием, дополнительно не снижает показатели усталостной характеристики. Это связано с тем, что центральная часть шва при сварке трением с перемешиванием обладает наиболее мелкозернистой структурой и тем самым оказывает большее сопротивление усталости, когда обширные границы зерен препятствуют распространению усталостной трещины [9].

На образцах, выполненных сваркой трением с перемешиванием, расположение надреза также предопределяет значение циклической долговечности. При нанесении надреза по границе шва значения малоциклового усталости могут значительно снижаться в сравнении с нанесением надреза по центру шва. В этом случае развитие усталостной трещины от надреза происходит, как правило, от центра шва к его границе (рис. 5).

**Малоцикловая усталость (средние значения) различных типов
сварных конструктивно-подобных образцов**

Вид сварки	Тип соединения	Напряжение* $\sigma_{\text{нетто max}}$, МПа	Циклическая долговечность до разрушения $N \cdot 10^3$ циклов
Трением с перемешиванием	Один проход	157	140
	Два прохода	120	225
		167	25
	Два шва внахлест	120	3
		100	3
	С надрезом по границе шва	90	49
		120	28
		167	2
	С надрезом по центру шва	90	106
		120	72
		167	30
	С надрезом и отвер- стием по центру шва	90	105
		120	61
		167	20
Лазерная	Один проход	157	110
	С надрезом по центру шва	305	Разрушение при нагружении
		167	9
	С надрезом по границе шва	305	Разрушение при нагружении
		167	3

* Уровень напряжений составлял 0,4 и 0,5 от предела прочности.

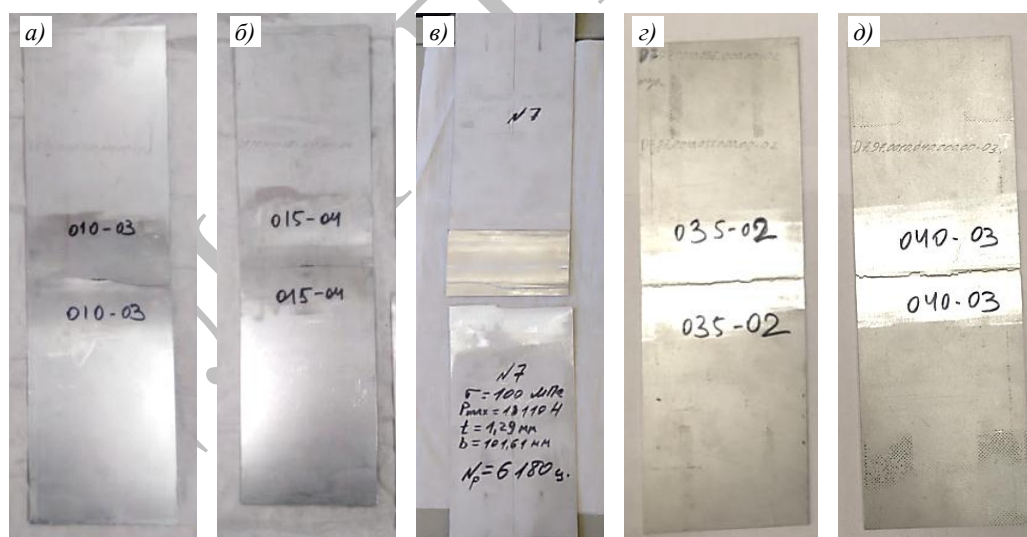


Рис. 5. Характер разрушения при циклических испытаниях сварных соединений конструктивно-подобных образцов, выполненных сваркой трением с перемешиванием (а–в) и лазерной сваркой (г, д) с надрезом по шву (а, г) и по зоне термического влияния (б, д), а также в виде нахлесточного соединения с двухрядным сварным швом (в)

По данным исследования КПО с двумя швами, полученными сваркой трением с перемешиванием, установлено, что соединения внахлест имеют пониженные значения усталостных характеристик. При этом разрушение, как правило, не располагается между швами, а проходит по «внешней» границе одного из швов (рис. 5, в).

Нанесение надреза на плоские КПО, выполненные лазерной сваркой, значительно снижает сопротивление усталости. Установлено, что значения малоциклового усталости при выполнении надреза по линии сплавления на 66 % меньше, чем при нанесении надреза по центру шва. Развитие усталостной трещины в обоих случаях проходит по зоне шва, что связано с его дендритной литой структурой, оказывающей значительно меньшее сопротивление разрушению, чем равноосная мелкозернистая структура ядра сварного шва в соединениях, выполненных сваркой трением с перемешиванием.

Таким образом, с точки зрения применения стыковых сварных соединений, выполненных лазерной сваркой и сваркой трением с перемешиванием, из сплава В-1469 на алюминий-литиевой основе в конструкциях, в результате повреждения (когда надрез имитирует трещину) их ресурс значительно снижается, как и в случае использования исследуемых технологий для ремонта сварных соединений.

Оценку влияния сварочно-термического цикла на материал при выполнении тавровых соединений проводили с помощью исследования их микротвердости. Измерения проводили вдоль центра нижней части таврового соединения, нулевая точка принята в центре пересечения линий сплавления, поэтому микротвердость имеет симметричный характер распределения (рис. 6).

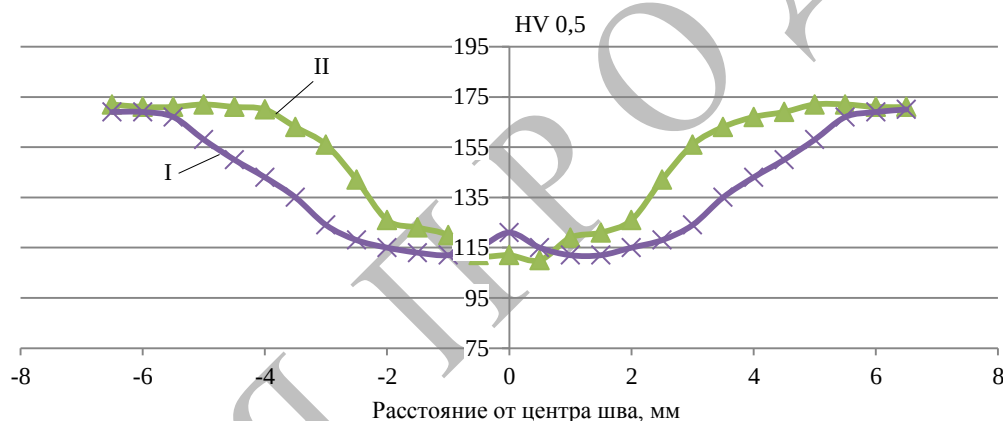


Рис. 6. Распределение микротвердости тавровых сварных соединений, выполненных по режимам I и II

Установлено, что ширина зоны разупрочнения при скорости сварки $< 0,01$ м/с (режим I) составляет ~ 10 мм и может быть уменьшена при скорости сварки $> 0,03$ м/с до 8 мм (режим II).

Известно, что тавровые соединения алюминиевых сплавов более склонны к пористости в сравнении со стыковыми соединениями. Поэтому сварку тавровых соединений проводили на пониженной в 2 раза скорости (относительно сварки стыковых соединений). Это связано с большей продолжительностью нахождения сварочной ванны в жидкой фазе и оптимизацией условий для ее дегазации, что необходимо для этого типа соединений [20].

Подварку (второй проход) тавровых соединений проводили с увеличением мощности на 15–20 % при той же скорости, при которой проведен и первый проход. Исследование воздействия режимов лазерной сварки и подварки тавровых соединений сплава В-1469 на структуру проводили с целью обеспечения гарантированного провара по всей толщине заготовки (рис. 7, а, б).

Исследование структуры подтвердило возможность применения подобранных ранее режимов для исправления дефектов типа трещины или непровара (рис. 7, б, г).

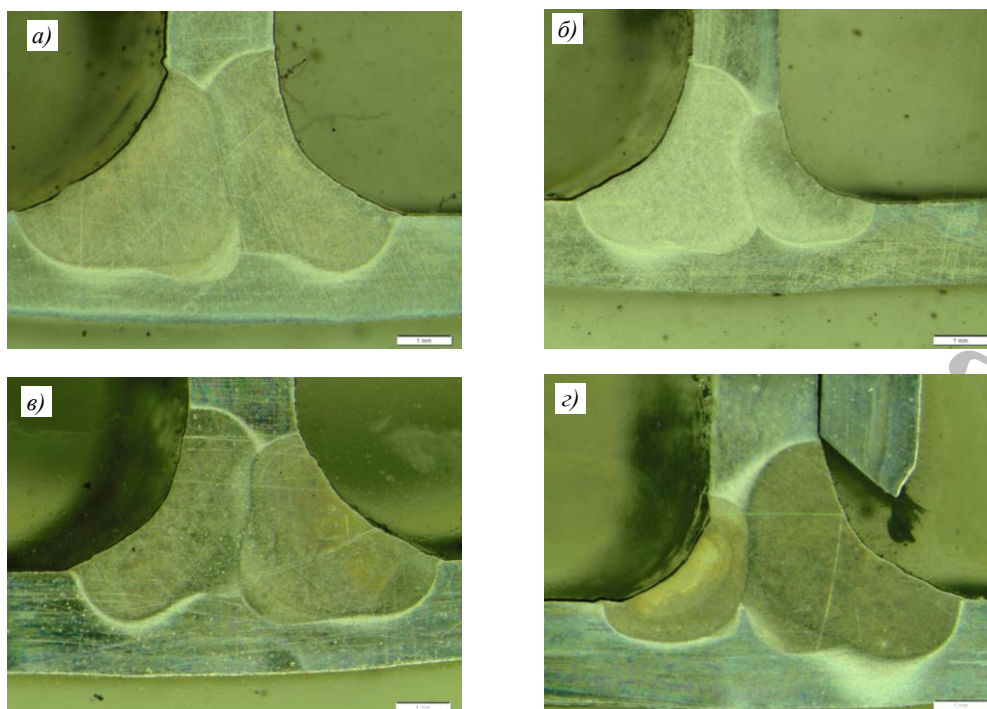


Рис. 7. Макроструктура сварных тавровых соединений, выполненных лазерной сваркой по режимам I (а, б) и II (в, г) и лазерной сваркой с подваркой (б, г)

При изучении воздействия режимов сварки лазером и подварки тавровых соединений данного сплава на механические свойства выявлено, что прочность тавровых соединений (для всех выбранных режимов) находится на высоком уровне и составляет 450–460 МПа (табл. 3). Повышение пластичности тавровых соединений на 34 % достигается при сварке по режиму I. При этом вне зависимости от скорости сварки (в исследуемом диапазоне) повторный (ремонтный) проход лазерной сварки снижает прочностные характеристики соединений на ~30 % за счет двукратного влияния термического цикла при сварке на околошовную зону при увеличении показателей пластичности на 9–15 %.

Таблица 3

**Механические характеристики тавровых сварных соединений сплава В-1469
(средние значения)**

(средние значения)				
Режим лазерной сварки	Технологический вариант	σ_b , МПа	α , градус	Малоцикловая усталость* $N \cdot 10^3$, цикл
Режим I при скорости сварки $\leq 0,01$ м/с	Лазерная сварка	450	55	≥ 150
	Лазерная сварка с подваркой	340	60	
Режим II при скорости сварки $\geq (0,02-0,03)$ м/с	Лазерная сварка	460	41	
	Лазерная сварка с подваркой	350	47	
* При $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 157$ МПа.				

Тавровые соединения, изготовленные при помощи лазерной сварки по двум режимам, гарантируют довольно высокие показатели малоцикловой усталости – более $150 \cdot 10^3$ циклов без разрушения. Но поскольку режим сварки I обеспечивает более высокие значения пластичности при снижении уровня прочности всего на 2 %, он является более предпочтительным для изготовления элементов более сложной конфигурации.

Заключения

Подварка (ремонтный вариант) стыковых КПО, изготовленных с помощью сварки трением с перемешиванием, снижает прочность с 405 до 330 МПа. Остаточная прочность соединения встык, изготовленного при помощи двух проходов сварки трением с перемешиванием, на 25 % больше, чем у соединения, отремонтированного при повторном проходе методом лазерной сварки.

Проведенные ресурсные испытания показали высокую чувствительность стыковых соединений сплава В-1469 к надрезам. Значения характеристик малоциклового усталости на стыковых образцах с надрезом по линии сплавления на 66 % меньше, чем с надрезом по центру шва.

Тавровые сварные соединения алюминий-литиевого сплава В-1469, изготовленные лазерной сваркой, обладают достаточно высокими значениями прочности, пластичности и сопротивления усталости. Таким образом, современные способы сварки, такие как лазерная и сварка трением с перемешиванием, могут быть использованы при изготовлении перспективных штамповочных конструкций изделий авиационной техники из высокопрочных сплавов третьего поколения на алюминий-литиевой основе.

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

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., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. № 8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 3–10.
5. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
6. Антипов В.В., Ткаченко Е.А., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Овсянников Б.В. Влияние режимов гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и механические свойства слитков из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
7. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
8. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972. 408 с.
9. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение, 1969. 503 с.
10. Petrovic M., Veljic D., Rakin M. et al. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage // Materials in technology. 2012. Vol. 46. No. 3. P. 215–221.
11. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Journal Material Science Engineering. R. 2005. Vol. 50. P. 1–78.
12. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. № 9. С. 35–40.

13. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 // Сварочное производство. 2012. № 6. С. 30–36.
14. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Жегина И.П., Котельникова Л.В., Овчинников В.В. Сварка трением с перемешиванием высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1469 // Сварочное производство. 2012. № 4. С. 45–48.
15. Бакрадзе М.М., Пантелеев М.Д., Скупов А.А., Белозор В.Е., Пономарев П.А. Оптимизация механических характеристик сварных соединений, выполненных СТП, с использованием современных вычислительных систем // Труды ВИАМ. 2019. № 4 (76). Ст. 02. URL: www.viam-works.ru (дата обращения: 21.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-11-20.
16. Скупов А.А., Пантелеев М.Д., Иода Е.Н. Структура и свойства сварных соединений сплавов В-1579 и В-1481, выполненных лазерной сваркой // Труды ВИАМ. 2017. № 7 (55). Ст. 07. URL: www.viam-works.ru (дата обращения: 21.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7.
17. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П. и др. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1. С. 8–12.
18. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминиево-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. № 11. С. 14–18.
19. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Котельникова Л.В., Оглодков М.С. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461 // Сварочное производство. 2010. № 11. С. 14–17.
20. Chang B., Allen C., Blackburn J., Hilton P. Thermal and fluid flow characteristics and their relationships with porosity in laser welding of AA5083 // Physics Procedia. 2013. Vol. 41. P. 478–487.

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., Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu. Aluminium-lithium alloys of a new generation and layered aluminum-glass plastics based on them. *Tsvetnye metally*, 2016, no. 8 (884), pp. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
3. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Rare metals and rare-earth elements are materials for modern and future high technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S2, pp. 3–10.
5. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
6. Antipov V.V., Tkachenko E.A., Zajtsev D.V., Selivanov A.A., Ovsyannikov B.V. The influence of homogenizing annealing regimes on the structural phase state and mechanical properties of aluminum-lithium alloy 1441 ingots. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-44-52.
7. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Kozlova O.Yu., Panteleev M.D., Osipov N.N., Klychev A.V. Manufacturing capability of Al–Li 1441 alloy details. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
8. Honikomb R. *Plastic deformation of metals*. Moscow: Mir, 1972, 408 p.
9. Haywood R.B. *Design for fatigue*. Moscow: Mashinostoenie, 1969, 503 p.
10. Petrovic M., Veljic D., Rakin M. et al. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage. *Materials in technology*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 215–221.

11. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing. *Journal Material Science Engineering*. R, 2005, vol. 50, pp. 1–78.
12. Shtrikman M.M. State and development of the process of friction welding of linear joints. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2007, no. 9, pp. 35–40.
13. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V. and other Features of the formation of a welded joint during friction stir welding of aluminum alloy V-1469. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 6, pp. 30–36.
14. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Zhegina I.P., Kotelnikova L.V., Ovchinnikov V.V. Friction stir welding of high-strength aluminum-lithium alloy V-1469. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 4, pp. 45–48.
15. Bakradze M.M., Panteleyev M.D., Skupov A.A., Belozor V.E., Ponomarev P.A. FSW-joints mechanical characteristics optimization by modern computing systems. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 21, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-11-20.
16. Skupov A.A., Pantelev M.D., Ioda E.N. Microstructure and mechanical properties of V-1579 and V-1481 laser welds. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 21, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-7-7.
17. Klochkova Yu.Yu., Grushko O.E., Lantsova L.P., Burlyaeva I.P., Ovsyannikov B.V. Development in industrial production of semi-finished products from perspective aluminum lithium alloy V-1469. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 1, pp. 8–12.
18. Shalin R.E., Efremov I.S., Yarovsky Yu.L., Lukin V.I. Experience in designing and manufacturing large-sized structures from aluminum-lithium alloys for products of rocket and space technology. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1996, no. 11, pp. 14–18.
19. Lukin V.I., Ioda E.N., Bazeskin A.V., Lavrenchuk V.P., Kotelnikova L.V., Oglodkov M.S. Improving the reliability of welded joints from high-strength aluminum-lithium alloy V-1461. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2010, no. 11, pp. 14–17.
20. Chang B., Allen C., Blackburn J., Hilton P. Thermal and fluid flow characteristics and their relationships with porosity in laser welding of AA5083. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 478–487.

Информация об авторах

Пантелеев Михаил Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Свиридов Александр Владимирович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скупов Алексей Алексеевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Одинцов Никита Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail D. Panteleev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Aleksey A. Skupov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita S. Odintsov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.03.2022.

The article was submitted 17.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.03.2022.

Научная статья

УДК 669.721.5

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ, ОСОБЕННОСТЕЙ ФАЗОВОГО СОСТАВА И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ МАГНИЕВОГО СПЛАВА ВМД16

М.В. Акинина¹, И.В. Мостяев¹, Е.Ф. Волкова¹, А.А. Алиханян¹

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

Аннотация. Изложены результаты сравнительных исследований структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16. Проанализировано, что повышение прочностных и пластических характеристик деформированных полуфабрикатов из сплава ВМД16, а также эффективное снижение их анизотропии может быть обусловлено формированием мелкозернистой структуры и особенностями фазового состава, в том числе наличием наноразмерных пластин LPSO-фаз. Показано, что LPSO-фазы обнаружены в литом, термически обработанном (гомогенизированном) и деформированном состояниях сплава ВМД16.

Ключевые слова: магниевый сплав, деформируемый сплав, микроструктура, фазовый состав, LPSO-фазы, анизотропия, штамповка

Для цитирования: Акинина М.В., Мостяев И.В., Волкова Е.Ф., Алиханян А.А. Сравнительные исследования структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого сплава ВМД16 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.

Scientific article

COMPARATIVE STUDIES OF THE STRUCTURE, FEATURES OF THE PHASE COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF DEFORMED SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM VMD16 MAGNESIUM ALLOY

M.V. Akinina¹, I.V. Mostyaev¹, E.F. Volkova¹, A.A. Alikhanyan¹

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

Abstract. The article presents the results of comparative studies of the structure, features of the phase composition and mechanical properties of deformed semi-finished products from the VMD16 magnesium alloy. It is analyzed that an increase of the strength and plastic characteristics of deformed semi-finished products from the VMD16 alloy, as well as an effective decrease of their anisotropy, can also be caused by the formation of a fine-grained structure and features of the phase composition, including the presence of nanoscale plates of LPSO-phases. It is shown that LPSO-phases are found in the cast, heat-treated (homogenized), and deformed states of VMD16 alloy.

Keywords: magnesium alloy, wrought alloy, microstructure, phase composition, LPSO-phases, anisotropy, stamping

For citation: Akinina M.V., Mostyaev I.V., Volkova E.F., Alikhanyan A.A. Comparative studies of the structure, features of the phase composition and mechanical properties of deformed semi-finished products from VMD16 magnesium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-36-50.

Введение

Одной из ключевых задач при создании современной авиационной техники является снижение массы и повышение весовой эффективности конструкции летательного аппарата. Постоянное стремление повысить эффективность использования топлива вынуждает производителей авиационной техники искать новые решения по применению существующих и разработке новых более легких материалов.

Материалы, которые будут использоваться при изготовлении конструкций летательных аппаратов, должны выдерживать резкий перепад от низких температур на большой высоте до температуры окружающей среды на уровне земли, а также иметь высокое отношение прочности и жесткости к массе [1, 2].

Для материалов, отправляющихся в полет, важна не просто прочность, а удельная прочность. «Летающие» металлы должны быть легкими, но при этом иметь большую абсолютную прочность. Одними из таких конструкционных материалов являются деформируемые магниевые сплавы. По степени прочности на единицу своей массы они превосходят некоторые легированные стали и алюминиевые сплавы. Использование конструкционных материалов на магниевой основе обеспечивает дополнительное преимущество в виде уменьшения массы и позволяет изыскивать новые способы облегчения конструкций.

Большое количество научных работ о магниевых сплавах, опубликованных за последние 2–3 года, свидетельствует о значительном интересе к этому конструкционному материалу, что связано с его малой массой и высокими удельными показателями прочности и жесткости.

Относительно недавно использование магниевых сплавов в определенных зонах коммерческих самолетов было запрещено из-за проблем с их воспламеняемостью, однако за рубежом в последние годы ситуация начала меняться. Магниевые сплавы являются весьма многообещающей альтернативой некоторым алюминиевым сплавам, которые в настоящее время широко используются в самолетостроении. В связи с этим Федеральным авиационным управлением США (FAA), Европейским агентством по авиационной безопасности (EASA) и разработчиками сплавов ведутся совместные работы по признанию безопасности магниевых сплавов.

Поэтому спрос на перспективные магниевые сплавы, устойчивые к коррозионному влиянию и воспламенению, для изготовления деталей летательных аппаратов как для коммерческой, так и военной авиации продолжает расти, а разработка магниевых сплавов, обладающих одновременно повышенными механическими характеристиками, такими как прочность и пластичность, остается весьма востребованной.

Исследования влияния химического состава, деформации и термической обработки на структуру и свойства, а также особенности применения полуфабрикатов из деформируемых магниевых сплавов представлены в различных зарубежных научных исследованиях, а также проводились авторами данной статьи на протяжении многих лет [3–15].

Анализ результатов собственных исследований, а также исследований зарубежных коллег позволяет утверждать, что одним из основных факторов эволюции деформируемых магниевых сплавов является легирование.

Благодаря применению более совершенных методов исследований микроструктуры стало возможным получить дополнительную информацию о специфике формирования и особенностях упрочняющих фаз в магниевых сплавах. Это позволяет точнее понять природу упрочнения деформируемых магниевых сплавов и дать необходимые рекомендации

по выбору композиции сплава, технологии изготовления, режимов термической обработки для обеспечения баланса прочностных и пластических характеристик [16–24].

В качестве потенциального подхода к упрочнению деформируемых магниевых сплавов можно выделить способность к образованию в этих сплавах длиннопериодных фаз (LPSO-фазы). Прочность LPSO-фазосодержащих сплавов значительно увеличивается за счет особенностей механизма деформации сплава. Возникновение в структуре LPSO-фазосодержащих сплавов в процессе пластической деформации деформационных изломов имеет важное значение при сдерживании внутризеренного дислокационного скольжения и таким образом может способствовать повышению прочностных свойств полуфабрикатов из магниевого сплава [25–36].

В данной работе изложены результаты сравнительных исследований структуры, особенностей фазового состава и механических свойств деформированных полуфабрикатов из магниевого LPSO-фазосодержащего сплава ВМД16.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [37].

Материалы и методы

Для проведения исследований использованы полуфабрикаты из деформируемого сплава ВМД16 системы Mg–Zn–Zr–PЗЭ (PЗЭ – редкоземельные элементы), изготовленные в заводских условиях.

Слитки отлиты с применением защитной атмосферы и после проведения механической обработки и гомогенизации подвергнуты прессованию на горизонтально-гидравлическом прессе с усилием 50 МН. Изготовлены прессованные промежуточные заготовки – полосы сечением 40×310 мм. Штамповки массой ~5 кг получены при деформации промежуточных заготовок на горизонтально-гидравлическом прессе с усилием 100 МН.

Механические свойства при растяжении получены в соответствии с ГОСТ 1497–84 на испытательной машине Zwick/Roell Z100.

Микроструктура и фазовые составляющие сплава исследованы на растровом электронном микроскопе с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа. Фотографии выполнены в режиме композиционного контраста, который определяется средним атомным номером области (фазы).

Исследования тонкой структуры проведены на просвечивающем электронном микроскопе с термополевым вольфрамовым катодом типа Шоттки при ускоряющем напряжении 200 кВ. Съемка выполнена в сканирующем режиме на нижний светлостойкий детектор.

Результаты и обсуждение

В качестве исходной заготовки для штамповки магниевых сплавов, как правило, используют прессованные полуфабрикаты в состоянии после горячей деформации без термической обработки.

При прессовании литой заготовки в целях ее использования для дальнейшей обработки давлением (горячей объемной штамповки) учитывается чувствительность магниевых сплавов (по причине гексагональной кристаллической структуры) к появлению поверхностных надрывов в результате даже незначительных растягивающих напряжений,

что чаще всего проявляется при прессовании слитков с крупнокристаллической структурой. В связи с этим слитки должны обладать равномерной мелкозернистой структурой.

Микроструктура сплава ВМД16 в исходном литом состоянии представляет собой равноосные зерна, по границам которых расположены крупные частицы эвтектики (рис. 1, *а, б*). В зернах наблюдается полосчатая структура, что характерно для магниевых сплавов, содержащих иттрий (рис. 1, *в*).

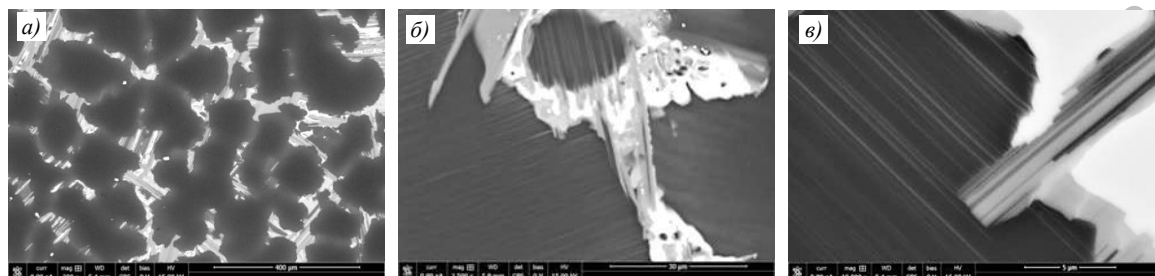


Рис. 1. Микроструктура образца из слитка сплава ВМД16 в литом состоянии: *а* – общий вид, $\times 200$; *б* – эвтектическая фаза, $\times 2500$; *в* – полосчатая структура около эвтектической фазы, $\times 10000$

Матрица сплава представляет собой твердый раствор α -магния, обогащенный иттрием. В эвтектике присутствуют фазы, в состав которых входят легирующие элементы: цинк, неодим, иттрий и лантан (светло-серые частицы) или цинк и иттрий (серые частицы) (рис. 2).

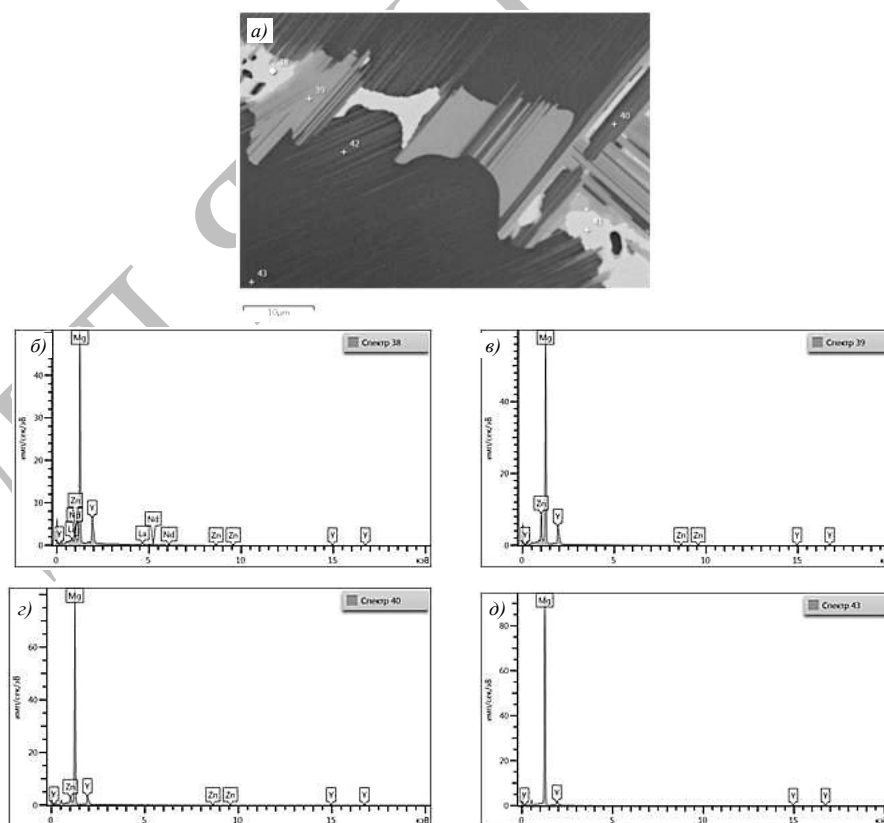


Рис. 2. Данные (точки набора спектров и соответствующие им спектрограммы) качественного микрорентгеноспектрального анализа структурных составляющих образца из слитка сплава ВМД16 в литом состоянии: *а* – места анализа; *б-г* – фазы в эвтектике; *д* – основа сплава

В микроструктуре слитка сплава ВМД16 также наблюдаются диффузные области повышенной концентрации циркония внутри зерен – первично кристаллизующиеся циркониды цинка (рис. 3, *а*). По границам зерен встречаются отдельные стержневидные частицы цирконидов цинка (рис. 3, *б*).

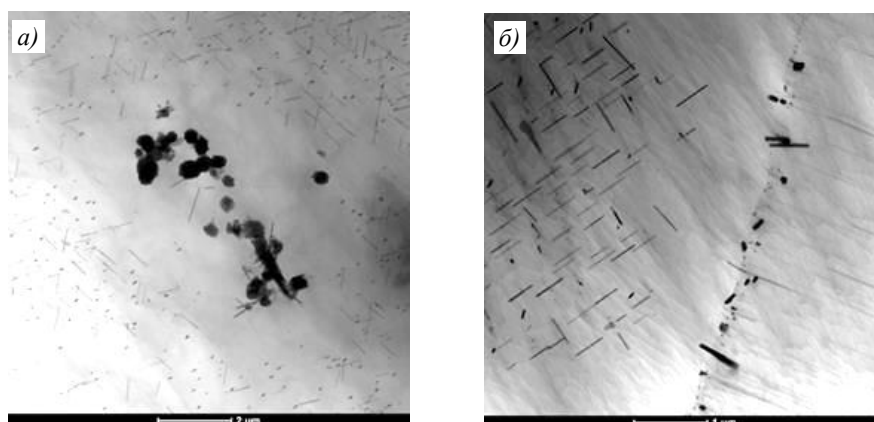


Рис. 3. Образования цирконидов цинка в образце из слитка сплава ВМД16 в литом состоянии: *а* – в объеме зерна; *б* – на межзеренных границах

Тонкая структура сплава в литом состоянии представляет собой колонии пластин длиннопериодных фаз (LPSO-фаз) на основе магния, содержащих иттрий и цинк, которые располагаются внутри зерен в объеме α -твердого магниевого раствора (рис. 4). Размеры пластин LPSO-фазы варьируются от 5 до 20 нм в зависимости от количества периодически повторяющихся слоев.

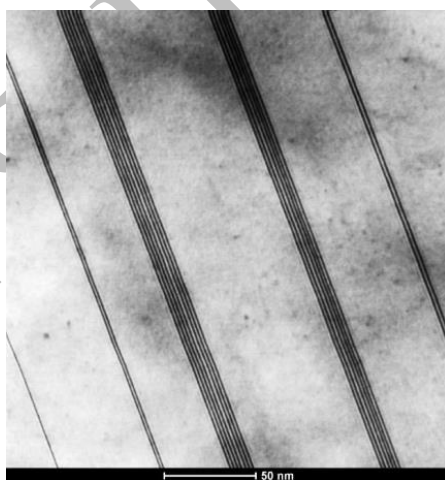


Рис. 4. Пластины LPSO-фаз в структуре образца из слитка сплава ВМД16 в литом состоянии

Перед деформацией большинство магниевых сплавов подвергают гомогенизационному отжигу, который значительно повышает пластичность сплавов, при этом заметно увеличивается скорость прессования.

В процессе термической обработки происходит частичное растворение эвтектических фаз, коагуляция дисперсных частиц по границам зерен (рис. 5, *а*, *б*). После термической обработки полосчатая структура наблюдается преимущественно вблизи эвтектики и границ зерен (рис. 5, *в*). В объеме зерен присутствуют дисперсные частицы (рис. 5, *г*).

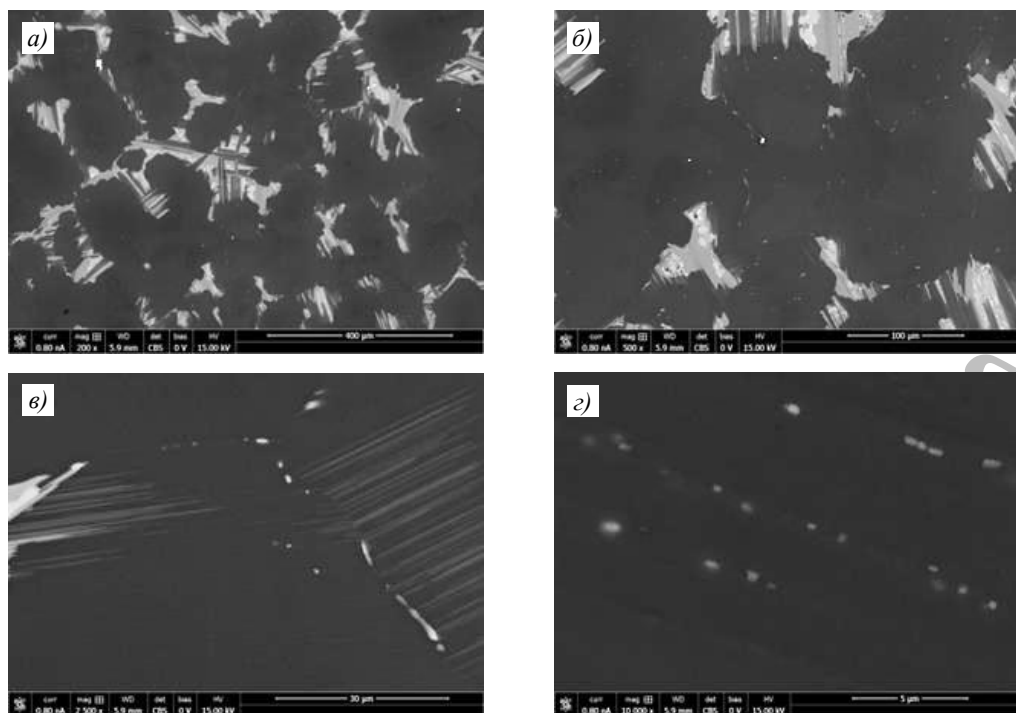


Рис. 5. Микроструктура образца из слитка сплава ВМД16 в термообработанном состоянии: *а, б* – общий вид (*а* – $\times 200$; *б* – $\times 500$); *в* – полосчатая структура около границ зерен и эвтектической фазы, $\times 2500$; *з* – дисперсные частицы в объеме зерна, $\times 10000$

Частичное растворение эвтектической фазы приводит к дополнительному обогащению α -твердого раствора на основе магния с цинком и иттрием. Однако процесс равномерного перераспределения этих элементов по всему объему зерна пройти полностью не успевает, что приводит к образованию более широких LPSO-пластин по сравнению с литым состоянием (рис. 6).

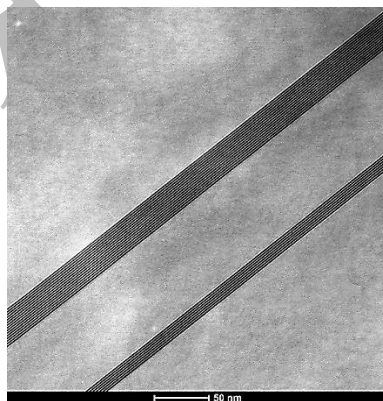


Рис. 6. Пластины LPSO-фазы в образце из слитка сплава ВМД16 в термообработанном состоянии

Микроструктура сплава ВМД16 после прессования представляет собой вытянутые в продольном направлении зерна твердого раствора на основе магния, легированного иттрием, и строчки эвтектической интерметаллидной фазы, в состав которой, как указано ранее, входят магний, иттрий, цинк и неодим (рис. 7, *а*). По границам и внутри эвтектической фазы наблюдаются частицы, в составе которых присутствует лантан (рис. 7, *б*); в зернах также наблюдается полосчатая структура (рис. 7, *в*).

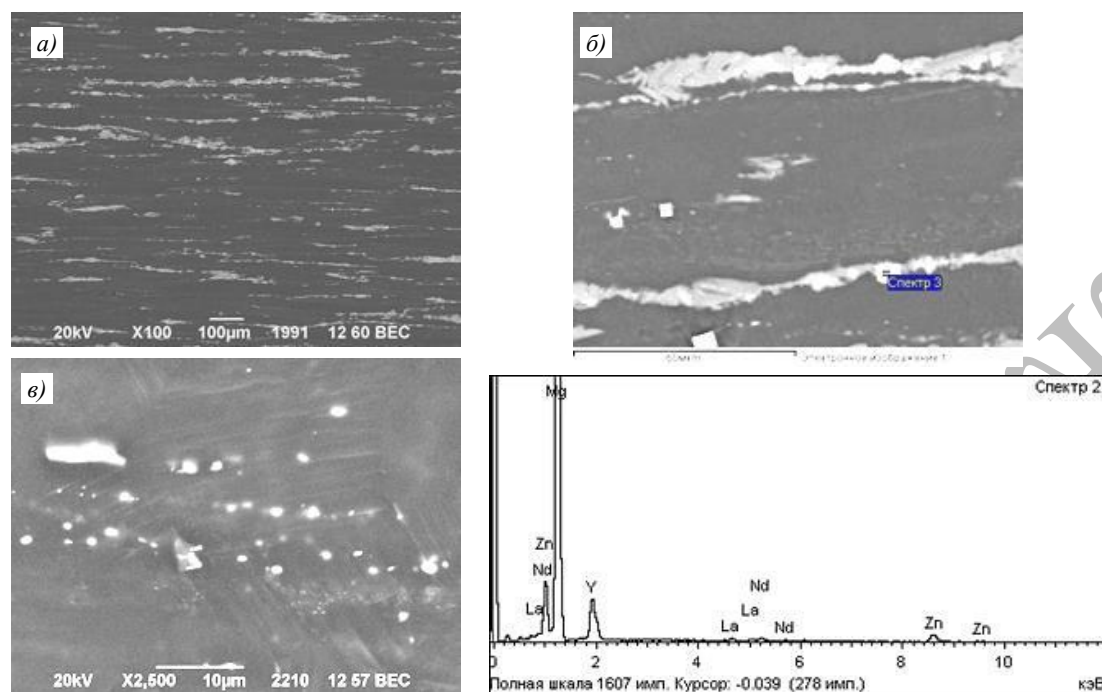


Рис. 7. Микроструктура образца из прессованной полосы сплава ВМД16 в продольном направлении: *а* – общий вид, $\times 100$; *б* – данные качественного микрорентгеноспектрального анализа структурных составляющих эвтектической фазы (область набора спектров и соответствующая спектрограмма); *в* – границы зерен, $\times 2500$

После прессования толщина LPSO-пластин существенно уменьшается и изменяется от 4 до 10 нм в зависимости от количества слоев (рис. 8). Подобные изменения толщины LPSO-пластин, по-видимому, можно объяснить ускоренной диффузией и перераспределением цинка и иттрия в них путем повышения температуры во время прессования либо в связи с полным растворением LPSO-пластин во время прессования и их повторным выделением при охлаждении полуфабриката.

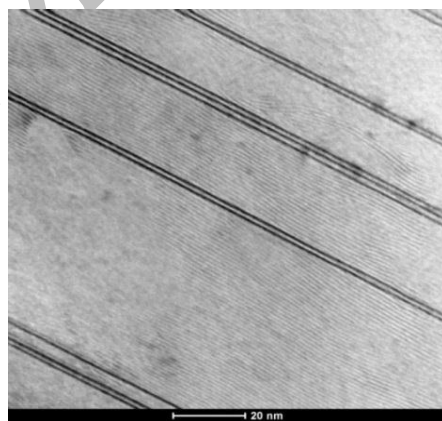


Рис. 8. Пластины LPSO-фазы в образце из прессованной полосы сплава ВМД16

Микроструктуры образцов из штамповки сплава ВМД16, вырезанных в направлении вдоль и поперек волокна, весьма близки и представляют собой практически равноосные зерна твердого раствора на основе магния, содержащие фрагменты первичной эвтектической составляющей и частицы интерметаллидных фаз на основе легирующих элементов – светлые частицы на фотографиях (рис. 9).

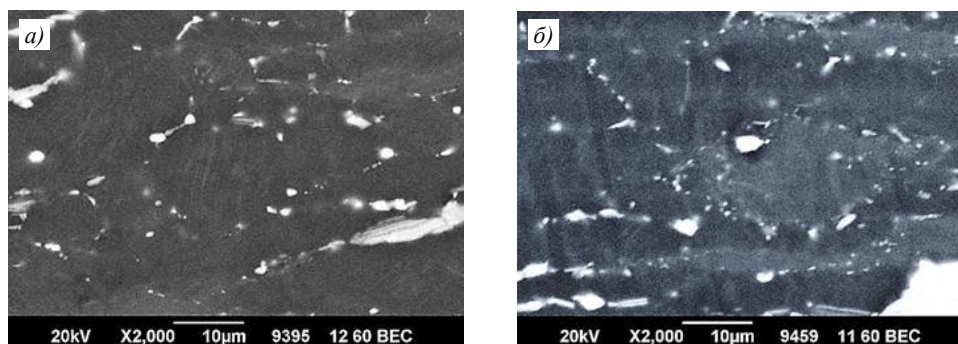


Рис. 9. Микроструктура образцов, вырезанных из штамповки сплава ВМД1, в исходном (после деформации) состоянии вдоль (а) и поперек волокна (б)

Данные качественного рентгеноспектрального микроанализа в различных фазовых областях образцов из штамповки подтверждают результаты, ранее полученные для литого, гомогенизированного и прессованного состояний сплава ВМД16. Зернограничные дисперсные белые частицы обогащены иттрием, неодимом и лантаном (рис. 10, а, б). Наблюдаются единичные крупные белые частицы, обогащенные иттрием (рис. 10, в, г).

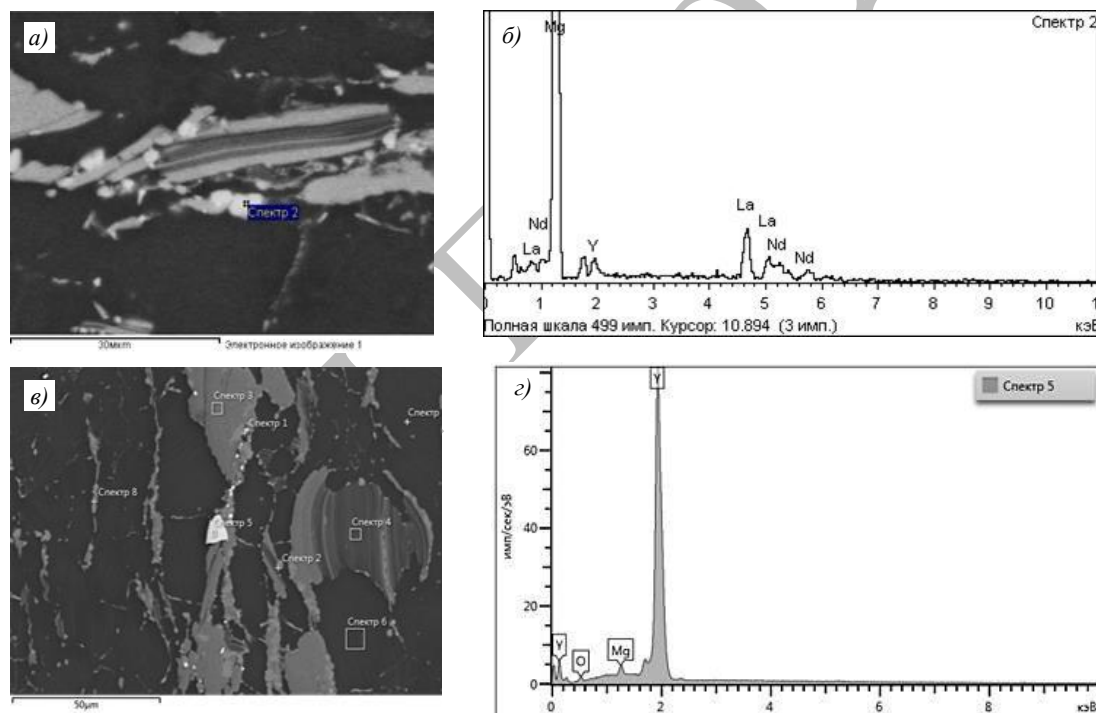


Рис. 10. Результаты качественного рентгеноспектрального микроанализа структурных составляющих образца из штамповки сплава ВМД16 в исходном (после деформации) состоянии: а, в – места анализа; б, г – спектры характеристического рентгеновского излучения в отмеченных точках

Пластины LPSO-фазы равномерно распределены по объему зерен и являются преимущественно двух- и трехслойными. Ширина наблюдаемых многослойных пластин не превышает 14 нм (рис. 11). Существенных отличий в сравнении с горячепрессованным состоянием не выявлено. О прохождении диффузионных процессов в период нагрева под деформацию и собственно при деформации сплава можно судить по некоторому утолщению пластин LPSO-фаз. Наблюдается некоторое растворение эвтектической

фазы, богатой цинком и иттрием, на границах зерен, вследствие чего твердый раствор на основе магния значительно обогащается этими элементами. Однако процесс равномерного перераспределения этих элементов по всему объему зерна пройти полностью не успевает, что приводит к образованию более широких LPSO-пластин.

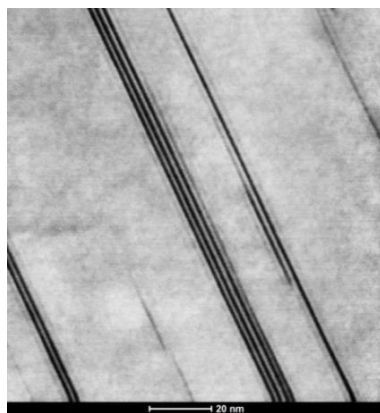


Рис. 11. Пластины LPSO-фазы в образце из штамповки сплава ВМД16 в исходном (после деформации) состоянии

В процессе деформации в микроструктуре возникают деформационные изломы в LPSO-фазах, которые препятствуют дальнейшему развитию внутризеренного дислокационного скольжения подобно границам зерен, что должно оказать положительное влияние на величину предела текучести и деформационное упрочнение сплава. Результатом такого «перегиба» LPSO-фаз и разделением зерен является также наличие развитой субзеренной структуры в материале штамповки.

На рис. 12 показана область микроструктуры, состоящая из зерен α -твердого раствора магния, когерентных деформационным изломам LPSO-фазы в базисной плоскости. Видно, что деформационные изломы LPSO-фазы переместились на соседние зерна α -твердого раствора магния, в результате чего и возникли новые границы зерен.

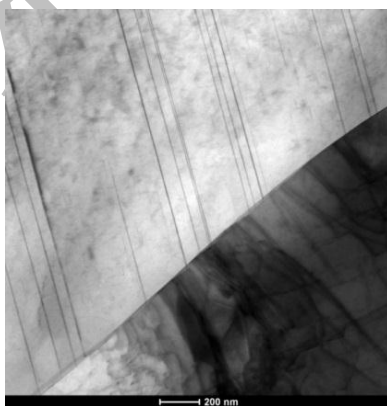


Рис. 12. Микроструктура образца из штамповки сплава ВМД16 в исходном (после деформации) состоянии – зерна α -магния, когерентные деформационным изломам LPSO-фазы

Образование таких границ зерен в α -твердом растворе магния является результатом генерации и синхронного проскальзывания базисных дислокационных пар противоположных знаков, поэтому новые границы зерен, образующиеся в результате деформационных «перегибов», можно назвать изломами границ зерен, подчеркивая тем самым их зависимость от деформационных изломов соседних LPSO-фаз.

Наличие деформационных изломов в LPSO-фазах должно оказывать положительное влияние на прочность сплава. Перемещение изломов LPSO-фаз на магниевую матрицу приводит к значительной пластической деформации материала, что, в свою очередь, должно повысить пластичность сплава. В то же время так называемые изломы границ зерен должны приводить к снижению количества двойников деформации в зернах сплава и, как следствие, ограничивать распространение микротрещин, являющихся фактором разупрочнения при воздействии пиковой нагрузки, что также в некоторой степени должно обеспечить пластичность и повысить способность материала сопротивляться преждевременному разрушению.

Различие в ориентации LPSO-фаз в зернах оказывает влияние на величину анизотропии прочностных и пластических характеристик, поскольку пластины LPSO-фаз, пронизывая весь объем каждого зерна, действуют как эффективное армирующее средство. Наблюдается увеличение напряжения, предшествующего разрушению образца, вдоль разных осей растяжения.

Представлены результаты механических испытаний образцов, вырезанных из деформированных полуфабрикатов сплава ВМД16 (см. таблицу).

Механические свойства* при растяжении деформированных полуфабрикатов из сплава ВМД16

Вид полуфабриката	Направление вырезки образца	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Промежуточная заготовка (прессованная полоса)	Продольное	$\frac{320-325}{325}$	$\frac{245-250}{250}$	$\frac{8,1-8,3}{8,2}$
	Поперечное	$\frac{280-290}{285}$	$\frac{225-230}{230}$	$\frac{8,0-8,2}{8,1}$
Штамповка	Продольное	$\frac{335-340}{340}$	$\frac{270-275}{275}$	$\frac{9,1-9,5}{9,3}$
	Поперечное	$\frac{320-325}{320}$	$\frac{265-270}{265}$	$\frac{9,0-9,3}{9,1}$

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

В поперечном направлении коэффициент анизотропии по пределу прочности для прессованной полосы составляет 14 %, а по пределу текучести ~9 %. Это свидетельствует о наличии малой анизотропии свойств и может считаться хорошим результатом, так как допускается, что прочностные свойства, определяемые на образцах, вырезанных в поперечном направлении, из прессованных полуфабрикатов, могут быть снижены до 17–18 % по сравнению со свойствами образцов, вырезанных в продольном направлении.

Повышение значений пределов прочности и текучести прессованной полосы после проведения операции штампования объясняется наличием деформационных изломов в LPSO-фазах и последующим измельчением структуры.

Заключения

Во всех изученных состояниях в структуре сплава ВМД16 формируются наноразмерные пластины самоорганизующихся LPSO-фаз, состоящие из периодических слоев, содержащих в определенном порядке атомы иттрия, цинка и магния.

Термическая обработка и пластическая деформация приводят к трансформации LPSO-фаз, что выражается в количественном перераспределении содержания иттрия и цинка в периодических рядах, а также в изменении числа рядов в наноразмерных пластинах LPSO-фаз.

В процессе деформации в микроструктуре сплава ВМД16 возникают деформационные изломы в LPSO-фазах, которые препятствуют движению дислокаций подобно границам зерен и, как следствие, измельчению микроструктуры, что в итоге способствует

упрочнению сплава. Деформационные изломы LPSO-фазы также способны перемещаться на соседние зерна α -твердого раствора магния, в результате чего возникают новые границы зерен.

Таким образом, малую анизотропию прочностных свойств при сохранении хорошего запаса пластичности для штамповок из сплава ВМД16 можно объяснить формированием особого фазового состава и возникновением в LPSO-фазах деформационных изломов, которые способствуют формированию равноосной мелкозернистой структуры в направлениях как вдоль, так и поперек волокна [8, 11, 37–46].

Список источников

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 23–47.
3. Polmear I.J. Recent Developments in Light Alloys // Materials Transactions. 1996. Vol. 37 (1). P. 12–37.
4. Mordike B., Ebert T. Magnesium: Properties-Applications-Potential // Materials Science and Engineering: A. 2001. Vol. 302 (1). P. 37–45.
5. Agnew S.R. Wrought magnesium: A 21st century outlook // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2004. Vol. 56 (5). P. 20–21.
6. Bettles C., Gibson M. Current wrought magnesium alloys: Strengths and weaknesses // JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society. 2005. Vol. 57 (5). P. 46–49.
7. Yang Z., Li J., Zhang J., Lorimer G., Robson J. Review on Research and Development of Magnesium Alloys // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2008. Vol. 21 (5). P. 313–328.
8. Papenberg N.P., Gneiger S., Weibensteiner I. et al. Mg-Alloys for Forging Applications – A Review // Materials. 2020. Vol. 13 (4). P. 985. DOI: 10.3390/ma13040985.
9. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевого сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
10. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
11. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В. Сравнительный анализ анизотропии механических свойств и микроструктуры деформированных полуфабрикатов из высокопрочных магниевых сплавов с РЗЭ // Труды ВИАМ. 2018. № 5 (65). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-24-33.
12. Карачевцев Ф.Н., Ерошкин С.Г., Мостяев И.В., Акинина М.В., Славин А.В. Разработка стандартных образцов состава магниевых сплавов марок ВМЛ20 и ВМД16 // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47.
13. Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Акинина М.В. Сравнительные исследования влияния фазового состава на механические и технологические свойства магниевых сплавов МА20-СП и МА2-1 // Труды ВИАМ. 2018. № 1 (61). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-5-5.
14. Магниевые сплавы: справочник в 2 т. / под ред. И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. М.: Metallurgia, 1978. Т. 2. 295 с.
15. Бондарев Б.И. Плавка и литье деформируемых магниевых сплавов. М.: Metallurgia, 1973. 287 с.
16. Briffod F., Ito S., Shiraiwa T., Enoki M. Effect of long period stacking ordered phase on the fatigue properties extruded Mg–Y–Zn alloys // International Journal of Fatigue. 2019. Vol. 128. P. 105–205.
17. Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg–Zn–Y alloys with 14H long period ordered structure // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. P. 959–965.

18. Zhang J.H., Leng Z., Liu S.J. et al. Microstructure and mechanical properties of Mg–Gd–Dy–Zn alloy with long period stacking ordered structure or stacking faults // *Journal of Alloys and Compounds*. 2011. Vol. 509. P. 7717–7722.
19. Shao J.B., Chen Z.Y., Chen T. et al. Texture evolution, deformation mechanism and mechanical properties of the hot rolled Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy containing LPSO phase // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 731. P. 479–486.
20. Kim J.K., Sandlobes S., Rabbe D. On the room temperature deformation mechanisms of a Mg–Y–Zn alloy with long-period-stacking ordered structure // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 82. P. 414–423.
21. Hagihara K., Li Z., Yamasaki M. et al. Strengthening mechanisms acting in extruded Mg-based long-period stacking ordered (LPSO)-phase alloys // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 163. P. 226–239.
22. Shao X.H., Yang Z.Q., Ma X.L. Strengthening and toughening mechanisms in Mg–Zn–Y alloy with a long period stacking ordered structure // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. P. 4760–4771.
23. Tahreen N., Zhang D.F., Pan F.S. et al. Characterization of hot deformation behavior of an extruded Mg–Zn–Mn–Y alloy containing LPSO phase // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 644. P. 814–823.
24. Hagihara K., Yokotani N., Umakoshi Y. Plastic deformation behavior of Mg₁₂YZn with 18R long-period stacking ordered structure // *Intermetallics*. 2010. Vol. 18. P. 267–276.
25. Somekawa H., Ando D., Hagihara K. et al. Intrinsic kink bands strengthening induced by several wrought-processes in Mg–Y–Zn alloys, containing LPSO phase // *Materials Characterization*. 2021. Vol. 179. Art. 111348.
26. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Plastic deformation behavior of Mg₈₉Zn₄Y₇ extruded alloy composed of long-period stacking ordered phase // *Intermetallic*. 2010. Vol. 18. P. 1079–1085.
27. Nakasuji Y., Somekawa H., Yuasa M. et al. Quantitative kink boundaries strengthening effect of Mg–Y–Zn alloy containing LPSO phase // *Materials Letters*. 2021. Vol. 292. Art. 192625.
28. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Дуюнова В.А., Алиханян А.А. Новые исследования в области легирования и деформации современных магниевых сплавов. Обзор // *Металлы*. 2022. № 2. С. 1–11.
29. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В., Алиханян А.А. Исследование влияния высокотемпературных нагревов на структуру, фазовый состав и свойства малогабаритных штамповок из магниевого сплава ВМД16 // *Металлы*. 2021. № 6. С. 26–33.
30. Hagihara K., Okamoto T., Izuno H. et al. Plastic deformation behavior of 10H-type synchronized LPSO phase in a Mg–Zn–Y system // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 109. P. 90–102.
31. Hagihara K., Okamoto T., Yamasaki M. et al. Electron backscatter diffraction pattern analysis of the deformation band formed in the Mg-based long-period stacking ordered phase // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 117. P. 32–36.
32. Yamasaki M., Hagihara K., Inoue S. et al. Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg–Zn–Y alloy using intragranular misorientation axis analysis // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 2065–2076.
33. Hagihara K., Kinoshita A., Fukusumi Y. et al. High-temperature compressive deformation behavior of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy containing a long-period stacking ordered (LPSO) phase // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 560. P. 71–79.
34. Somekawa H., Schuh C.A. Nanoindentation behavior and deformed microstructures in coarse-grained magnesium alloys // *Scripta Materialia*. 2013. Vol. 68. P. 416–419.
35. Zambaldi C., Zehnder C., Rabbe D. Orientation dependent deformation by slip and twinning magnesium during single crystal indentation // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 91. P. 267–288.
36. Kitahara H., Mayama T., Okumura K. Anisotropic deformation induced by spherical indentation of pure Mg single crystals // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 78. P. 290–300.
37. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ 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.

38. Shi B., Chen R., Ke W. Effects of yttrium and zinc on the texture, microstructure and tensile properties of hot-rolled magnesium plates // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 560. P. 62–70.
39. Wang Q., Du W., Liu K. et al. Microstructure, texture and mechanical properties of as-extruded Mg–Zn–Er alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 602. P. 32–39.
40. Xu X., Chen X., Du W. et al. Effect of Nd on microstructure and mechanical properties of as-extruded Mg–Y–Zr–Nd alloy // *Journal of Materials Science & Technology*. 2017. Vol. 33 (9). P. 926–934.
41. Yang Q., Jiang B., Pan H. et al. Influence of different extrusion processes on mechanical properties of magnesium alloy // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2014. Vol. 2 (3). P. 220–224.
42. Wang H.Y., Rong J., Yu Z.Y. et al. Tensile properties, texture evolutions and deformation anisotropy of as-extruded Mg–6Zn–1Zr magnesium alloy at room and elevated temperatures // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 697. Art. 149e157.
43. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. P. 6282–6293.
44. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure // *Materials Transactions*. 2007. Vol. 48 (11). P. 2986–2992.
45. Abe E., Ono A., Itoi T. et al. Polytypes of long-period stacking structures synchronized with chemical order in a dilute Mg–Zn–Y alloy // *Philosophical Magazine Letters*. 2011. Vol. 91 (10). P. 690–696.
46. Hagihara K., Nakano T. Strengthening of Mg-based long-period stacking ordered (LPSO) phase with deformation kink bands // *Material Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 763. Art. 138163.

References

1. Kablov E.N. Aviation materials science: results and prospects. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
2. Kablov E.N. Aviation materials science in the XXI century. Prospects and tasks. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS; VIAM, 2002, pp. 23–47.
3. Polmear I.J. Recent Developments in Light Alloys. *Materials Transactions*, 1996, vol. 37 (1), pp. 12–37.
4. Mordike B., Ebert T. Magnesium: Properties-Applications-Potential. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 302 (1), pp. 37–45.
5. Agnew S.R. Wrought magnesium: A 21st century outlook. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2004, vol. 56 (5), pp. 20–21.
6. Bettles C., Gibson M. Current wrought magnesium alloys: Strengths and weaknesses. *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, vol. 57 (5), pp. 46–49.
7. Yang Z., Li J., Zhang J., Lorimer G., Robson J. Review on Research and Development of Magnesium Alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2008, vol. 21 (5), pp. 313–328.
8. Papenberg N.P., Gneiger S., Weibensteiner I. et al. Mg-Alloys for Forging Applications – A Review. *Materials*, 2020, vol. 13 (4), p. 985. DOI: 10.3390/ma13040985.
9. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
10. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. The ways of rising of wrought magnesium alloys main mechanical characteristics. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
11. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V. Comparative analysis of mechanical properties anisotropy and microstructure of semi-finished products from high-strength magnesium alloys with REE. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-24-33.
12. Karachevtsev F.N., Eroshkin S.G., Mostayev I.V., Akinina M.V., Slavin A.V. Development of standard samples of magnesium alloys VML20 and VMD16. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-39-47.

13. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Akinina M.V. Comparative researches of phase composition influence on mechanical and technological properties of MA20-SP and MA2-1 magnesium alloys. *Trudy VIAM*, 2018, no. 1 (61), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 03, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-5-5.
14. *Magnesium alloys*: reference book in 2 vol. Ed. I.I. Guriev, M.V. Chukhrov. Moscow: Metallurgiya, 1978, vol. 2, 295 p.
15. Bondarev B.I. *Melting and casting of wrought magnesium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 287 p.
16. Briffod F., Ito S., Shiraiwa T., Enoki M. Effect of long period stacking ordered phase on the fatigue properties extruded Mg–Y–Zn alloys. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 128, pp. 105–205.
17. Yoshimoto S., Yamasaki M., Kawamura Y. Microstructure and mechanical properties of extruded Mg–Zn–Y alloys with 14H long period ordered structure. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, pp. 959–965.
18. Zhang J.H., Leng Z., Liu S.J. et al. Microstructure and mechanical properties of Mg–Gd–Dy–Zn alloy with long period stacking ordered structure or stacking faults. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 7717–7722.
19. Shao J.B., Chen Z.Y., Chen T. et al. Texture evolution, deformation mechanism and mechanical properties of the hot rolled Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy containing LPSO phase. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 731, pp. 479–486.
20. Kim J.K., Sandlobes S., Rabbe D. On the room temperature deformation mechanisms of a Mg–Y–Zn alloy with long-period-stacking ordered structure. *Acta Materialia*, 2015, vol. 82, pp. 414–423.
21. Hagihara K., Li Z., Yamasaki M. et al. Strengthening mechanisms acting in extruded Mg-based long-period stacking ordered (LPSO)-phase alloys. *Acta Materialia*, 2019, vol. 163, pp. 226–239.
22. Shao X.H., Yang Z.Q., Ma X.L. Strengthening and toughening mechanisms in Mg–Zn–Y alloy with a long period stacking ordered structure. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 4760–4771.
23. Tahreen N., Zhang D.F., Pan F.S. et al. Characterization of hot deformation behavior of an extruded Mg–Zn–Mn–Y alloy containing LPSO phase. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 644, pp. 814–823.
24. Hagihara K., Yokotani N., Umakoshi Y. Plastic deformation behavior of Mg₁₂Y₂Zn with 18R long-period stacking ordered structure. *Intermetallics*, 2010, vol. 18, pp. 267–276.
25. Somekawa H., Ando D., Hagihara K. et al. Intrinsic kink bands strengthening induced by several wrought-processes in Mg–Y–Zn alloys, containing LPSO phase. *Materials Characterization*, 2021, vol. 179, art. 111348.
26. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Plastic deformation behavior of Mg₈₉Zn₄Y₇ extruded alloy composed of long-period stacking ordered phase. *Intermetallic*, 2010, vol. 18, pp. 1079–1085.
27. Nakasuji Y., Somekawa H., Yuasa M. et al. Quantitative kink boundaries strengthening effect of Mg–Y–Zn alloy containing LPSO phase. *Materials Letters*, 2021, vol. 292, art. 192625.
28. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Duyunova V.A., Alikhanyan A.A. New research in the field of alloying and deformation of modern magnesium alloys. Review. *Metally*, 2022, no. 2, pp. 1–11.
29. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V., Alikhanyan A.A. Investigation of the influence of high-temperature heating on the structure, phase composition and properties of small-sized forgings from the VMD16 magnesium alloy. *Metally*, 2021, no. 6, pp. 26–33.
30. Hagihara K., Okamoto T., Izuno H. et al. Plastic deformation behavior of 10H-type synchronized LPSO phase in a Mg–Zn–Y system. *Acta Materialia*, 2016, vol. 109, pp. 90–102.
31. Hagihara K., Okamoto T., Yamasaki M. et al. Electron backscatter diffraction pattern analysis of the deformation band formed in the Mg-based long-period stacking ordered phase. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 117, pp. 32–36.
32. Yamasaki M., Hagihara K., Inoue S. et al. Crystallographic classification of kink bands in an extruded Mg–Zn–Y alloy using intragranular misorientation axis analysis. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 2065–2076.

33. Hagihara K., Kinoshita A., Fukusumi Y. et al. High-temperature compressive deformation behavior of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy containing a long-period stacking ordered (LPSO) phase. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 560, pp. 71–79.
34. Somekawa H., Schuh C.A. Nanoindentation behavior and deformed microstructures in coarse-grained magnesium alloys. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, pp. 416–419.
35. Zambaldi C., Zehnder C., Rabbe D. Orientation dependent deformation by slip and twinning magnesium during single crystal indentation. *Acta Materialia*, 2015, vol. 91, pp. 267–288.
36. Kitahara H., Mayama T., Okumura K. Anisotropic deformation induced by spherical indentation of pure Mg single crystals. *Acta Materialia*, 2014, vol. 78, pp. 290–300.
37. 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.
38. Shi B., Chen R., Ke W. Effects of yttrium and zinc on the texture, microstructure and tensile properties of hot-rolled magnesium plates. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, vol. 560, pp. 62–70.
39. Wang Q., Du W., Liu K. et al. Microstructure, texture and mechanical properties of as-extruded Mg–Zn–Er alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 602, pp. 32–39.
40. Xu X., Chen X., Du W. et al. Effect of Nd on microstructure and mechanical properties of as-extruded Mg–Y–Zr–Nd alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, vol. 33 (9), pp. 926–934.
41. Yang Q., Jiang B., Pan H. et al. Influence of different extrusion processes on mechanical properties of magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2014, vol. 2 (3), pp. 220–224.
42. Wang H.Y., Rong J., Yu Z.Y. et al. Tensile properties, texture evolutions and deformation anisotropy of as-extruded Mg–6Zn–1Zr magnesium alloy at room and elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, vol. 697, art. 149e157.
43. Hagihara K., Kinoshita A., Sugino Y. et al. Effect of long-period stacking ordered phase on mechanical properties of Mg₉₇Zn₁Y₂ extruded alloy. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 6282–6293.
44. Kawamura Y., Yamasaki M. Formation and Mechanical Properties of Mg₉₇Zn₁RE₂ Alloys with Long-Period Stacking Ordered Structure. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48 (11), pp. 2986–2992.
45. Abe E., Ono A., Itoi T. et al. Polytypes of long-period stacking structures synchronized with chemical order in a dilute Mg–Zn–Y alloy. *Philosophical Magazine Letters*, 2011, vol. 91 (10), pp. 690–696.
46. Hagihara K., Nakano T. Strengthening of Mg-based long-period stacking ordered (LPSO) phase with deformation kink bands. *Material Science and Engineering: A*, 2019, vol. 763, art. 138163.

Информация об авторах

Акинина Мария Владимировна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Волкова Екатерина Федоровна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Алиханян Арман Артакович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

Arman A. Alikhanyan, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.04.2022.

The article was submitted 04.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 08.04.2022.

Научная статья

УДК 699.81

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60

ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ, АРМИРОВАННЫХ АРАМИДНЫМИ ТКАНЯМИ

А.Ч. Кан¹, Г.Ф. Железина¹, Г.С. Кулагина¹, Т.Р. Аюпов¹

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

Аннотация. Исследовано влияние состава и структуры арамидных органопластиков на стойкость к горению. Установлено, что армирующая ткань из арамидных волокон относится к категории самозатухающих материалов, устойчивость к горению конструкционных органопластиков зависит преимущественно от типа связующего, используемого в их составе, а также от толщины испытываемых образцов, что свидетельствует о возможности дальнейшего совершенствования авиационных органопластиков с позиции устойчивости к горению с целью удовлетворения постоянно возрастающих требований, предъявляемых к современной технике.

Ключевые слова: конструкционные органопластики, арамидные ткани, пожаробезопасность, горение

Для цитирования: Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 05. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

Scientific article

FIRE SAFETY OF STRUCTURAL ORGANIC PLASTICS REINFORCED WITH ARAMID FABRICS

A.Ch. Kan¹, G.F. Zhelezina¹, G.S. Kulagina¹, T.R. Ayupov¹

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 influence of the composition and structure of aramid organic plastics on the resistance to combustion is investigated. It is established that the reinforcing fabric of aramid fibers belongs to the category of self-extinguishing materials, the resistance of structural organic plastics to combustion depends mainly on the type of binder used in their composition, as well as on the thickness of the tested samples, which indicates the possibility of further improvement of aviation organic plastics in terms of resistance to combustion in order to meet the ever-increasing demands on modern technology.

Keywords: structural organic plastics, aramid fabrics, fire safety, combustion

For citation: Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R. Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 05. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

Введение

Безопасность эксплуатации авиационной техники в значительной степени зависит от типа и качества применяемых материалов [1–3]. Одним из основных требований, предъявляемых к материалам авиационного назначения, является пожаробезопасность

[4–6]. Возгорание самолетов – явление крайне редкое, однако вероятностью возникновения пожара нельзя пренебрегать, так как это может повлечь за собой большие человеческие жертвы, нанести материальный и экологический ущерб. Проблема обеспечения пожарной безопасности особенно актуальна при разработке полимерных композиционных материалов, доля которых в составе авиационных конструкций постоянно возрастает [7–9].

Пожарная безопасность полимерных композиционных материалов определяется их способностью к воспламенению и распространению процесса горения. Важным является также количество выделяемого при горении дыма и токсичных продуктов. Горение полимерных композиционных материалов – сложный многостадийный процесс, характер и интенсивность которого зависят от химической природы и строения композита [10, 11].

Известно, что физико-механические свойства полимерных композиционных материалов можно варьировать в широких пределах путем изменения их состава и структуры [12]. Это открывает возможности создавать и оптимизировать полимерные композиты с позиции их пожарной безопасности путем целенаправленного выбора компонентов и строения, обеспечивающих стойкость к горению. Необходимым условием для этого является изучение основных закономерностей, определяющих пожарную безопасность композитов: влияния химической природы полимерной матрицы и армирующего наполнителя, их объемного соотношения, схемы армирования и т. д. [13, 14].

Цель данной работы – изучение влияния состава и структуры арамидных органопластиков на стойкость к горению. В статье приведены сведения о характеристиках пожаробезопасности (группы горючести и дымообразования) конструкционных арамидных органопластиков, рекомендованных для изготовления средне- и слабонагруженных элементов авиационных конструкций.

Материалы и методы

Объектами исследования являются типовые конструкционные органопластики, используемые в конструкциях самолетов и вертолетов. В своем составе исследуемые органопластики содержат армирующую ткань на основе арамидных волокон СВМ или Русар НТ и различные полимерные связующие [15, 16]. Состав и характеристики исследуемых органопластиков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Состав и свойства органопластиков

Органо-пластик	Состав		Плотность, г/см ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
	наполнитель	связующее			
Органит 7Т	Ткань артикула 56313Н из волокна СВМ	Эпоксифенолформальдегидное 5-211-БН	1,32	700	33,1
Органит 10Т		Модифицированное эпоксидное УП-2227	1,32	740	34,0
Органит 11Т		Эпоксиполисульфоновое ВК-36РТ	1,38	680	30,5
Органит 12Т		Модифицированное эпоксидное ЭДТ-69Н	1,32	660	30,0
Органит 15Т		Фенольное ФП-520	1,35	440	22,0
Органит 16Т		Модифицированное эпоксидное ВС-2526К	1,32	720	38,5
ВКО-25	Ткань артикула 86-153-04НТ из волокна Русар НТ	Эпоксиполисульфоновое ВСЭ-34	1,34	890	39,0

Помимо типовых органопластиков в данной статье исследована горючесть органопластика Русар/УП-2217, предназначенного для изготовления защитного корпуса вентилятора турбореактивного двигателя (ТРД), который необходим для локализации осколков лопасти вентилятора в случае ее разрушения. В составе органопластика Русар/УП-2217 использована ткань Русар артикула 86-153-04НТ и эпоксидное связующее УП-2217. Испытаниям на горючесть подвергали органопластик Русар/УП-2217, а также его компоненты: армирующую ткань Русар НТ и полимерную матрицу УП-2217 в виде отвержденной отливки. Кроме того, испытывали образцы органопластика, вырезанные непосредственно из корпуса вентилятора, после стендовых испытаний. Для проведения испытаний на горючесть подготовили образцы стандартного размера 290×70 мм следующих типов:

- образцы органопластика на основе ткани Русар артикула 86-153-04НТ и связующего УП-2217, изготовленные в лабораторных условиях при толщине образцов 2 и 4 мм;
- образцы компонентов органопластика:
 - отливки отвержденного связующего УП-2217 толщиной 2,5 мм;
 - ткань Русар артикула 86-153-04НТ с поверхностной плотностью 88 ± 5 г/м² (испытаниям подвергали один слой ткани толщиной 0,12 мм);
- образцы органопластика толщиной 4, 12 и 19 мм, вырезанные из корпуса вентилятора, прошедшего стендовые испытания.

Испытания на горючесть проводили в соответствии с ОСТ1 90094–79 (АП-25, Приложение F, Часть I). Данный метод испытаний используется для оценки горючести материалов и элементов конструкций интерьера кабины пилота и пассажирских салонов. Испытательный центр НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ имеет аккредитацию на право проведения этого вида сертификационных испытаний.

Условия испытания: пламя газовой горелки с диаметром факела 40 мм и температурой 840–850 °С, продолжительность воздействия пламени 60 с. В соответствии с ОСТ1 90094–79 горючесть образцов (группа горючести) оценивается по продолжительности горения (t_f) после выноса из пламени и по размеру (высоте) участка прогоревшего материала (h). К группе трудносгорающих относятся материалы с параметрами t_f не более 0 с (материал не поддерживает горение) и h – не более 152 мм. К группе самозатухающих относятся материалы с параметрами t_f – не более 15 с и h – не более 152 мм. К группе сгорающих относятся материалы с параметрами t_f – более 15 с или h – более 152 мм.

Дымообразование органопластиков определяли в соответствии с ГОСТ 24632–81 и НЛГС-3 (1984). Сущность метода состоит в измерении интенсивности светового потока, проходящего через задымленное пространство в испытательной камере при термическом разложении образца. Определяются следующие показатели дымообразования материала: максимальная удельная оптическая плотность дыма за весь период испытания ($D_{\max}$), удельная оптическая плотность дыма за первые 2 и 4 мин испытания ($D_{\tau} = 2$, $D_{\tau} = 4$). Далее в соответствии с данными табл. 2 по величине показателей дымообразования ($D_{\max}$, $D_{\tau} = 2$, $D_{\tau} = 4$) материалу присваивается группа дымообразования.

Таблица 2

Классификация (группы) материалов по дымообразованию

Условный номер группы	Характеристики материала по дымообразованию	Удельная оптическая плотность дыма		
		$D_{\max}$	$D_{\tau} = 2$	$D_{\tau} = 4$
1	Практически не выделяющие дыма	Менее 5	–	–
2	Слабодымящие	От 5 до 50	–	Менее 16
3	Среднедымящие	От 50 до 200	–	От 16 до 100
4	Существеннодымящие	Более 200	Менее 100	От 100 до 200
5	Сильнодымящие	–	Более 100	Более 200

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

Результаты и обсуждение

Характеристики пожаробезопасности композита зависят от стойкости к горению его компонентов: армирующего наполнителя и полимерного связующего, а также от толщины материала, подвергающегося воздействию пламени. Исследования в этом направлении проведены на примере предназначенного для корпуса вентилятора ТРД органопластика Русар/УП-2217, содержащего компоненты типичной для конструктивных органопластиков химической природы – ткань из российских арамидных волокон и эпоксидное связующее.

Для оценки горючести (определения группы горючести) образцов органопластика, арамидной ткани и полимерной матрицы (в виде отливки отвержденного связующего) в соответствии с ОСТ1 90094–79 определяли продолжительность горения (t_f) образцов после выноса из пламени и размер участка прогоревшего материала (h).

Результаты испытаний арамидной ткани, полимерной матрицы и органопластика Русар/УП-2217 различной толщины представлены в табл. 2.

Установлено, что эпоксидное связующее УП-2217, используемое в составе органопластика Русар/УП-2217, при проведении испытаний имело продолжительность остаточного горения более 40 с, вследствие чего относится к категории сгорающих материалов.

Ткань Русар артикула 86-153-04НТ, являющаяся армирующим наполнителем органопластика, относится к группе самозатухающих материалов. Продолжительность горения арамидной ткани Русар артикула 86-153-04НТ составляет 3 с, а размер прогоревшего участка 45 мм.

Как видно из данных табл. 3, органопластик Русар/УП-2217 и фрагменты корпуса вентилятора из органопластика относятся к категории самозатухающих материалов при толщине 2 и 4 мм и к категории трудносгораемых – при толщине 12 и 19 мм.

Таблица 3

Характеристики пожаробезопасности образцов органопластика Русар/УП-2217, ткани Русар и полимерной матрицы УП-2217

Материал образца	Толщина, мм	Продолжительность горения, с	Размер прогоревшего участка, мм	Группа горючести по ОСТ1 90094–79
Органопластик Русар/УП-2217	2	3	70	Самозатухающие
	4	2	31	Самозатухающие
Ткань Русар НТ	0,12	3	45	Самозатухающие
Полимерная матрица УП-2217	2,5	44	130	Сгорающие
Фрагмент корпуса вентилятора из органопластика Русар/УП-2217	4	2	13	Самозатухающие
	12	0	13	Трудносгорающие
	19	0	Менее 10	Трудносгорающие

С целью имитации более жестких условий пожара проведены исследования по изменению характеристик горючести фрагмента корпуса вентилятора из органопластика Русар/УП-2217 при увеличении продолжительности выдержки в пламени сверх нормативов, предусмотренных ОСТ1 90094–79.

Результаты исследования представлены на рис. 1. Установлено, что при выдержке в пламени 300 с фрагмент корпуса толщиной 19 мм имеет продолжительность горения (после выноса из пламени) 15,5 с, размер прогоревшего участка 50 мм. При

экспозиции в пламени 900 с фрагмент корпуса не поддерживает горение (продолжительность остаточного горения равна нулю после выноса из пламени), размер прогоревшего участка составляет 52 мм. Органопластик Русар/УП-2217 толщиной 19 мм (стенка корпуса вентилятора) остается в группе трудносгораемых материалов при увеличении продолжительности времени выдержки в пламени в 15 раз сверх нормативов, предусмотренных ОСТ1 90094–79.

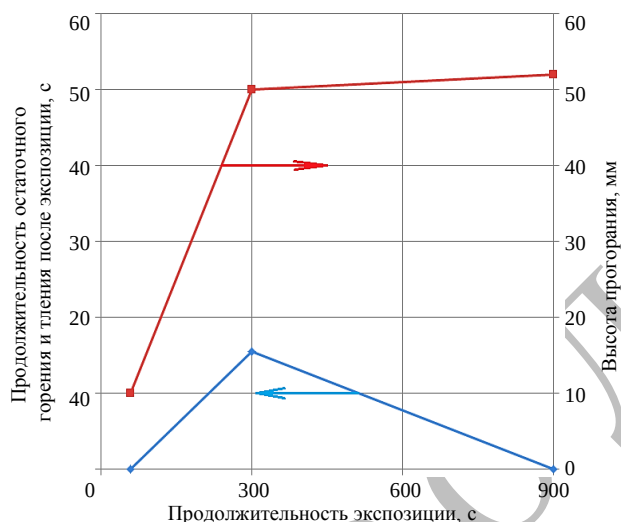


Рис. 1. Влияние продолжительности выдержки в пламени на параметры пожаробезопасности органопластика Русар/УП-2217

Таким образом, при исследовании горючести органопластика Русар/УП-2217 и его компонентов установлено, что наиболее слабым компонентом в отношении пожаробезопасности является полимерная эпоксидная матрица УП-2217, которая относится к категории сгорающих материалов. Армирующая арамидная ткань при толщине 0,12 мм является самозатухающим материалом. Органопластик на основе арамидной ткани Русар НТ и эпоксидного связующего УП-2217 относится к группам трудносгорающих или самозатухающих материалов в зависимости от толщины образца.

В табл. 4 представлены характеристики пожаробезопасности типовых органопластиков, применяемых в изделиях авиационной техники для изготовления средне- и слабонагруженных деталей планера и обшивок сотовых панелей.

Таблица 4

Пожаробезопасность конструкционных органопластиков

Материал	Характеристики пожаробезопасности	
	горючесть	дымообразование
Органит 7Т	Самозатухающий	Сильнодымящий
Органит 10Т	Сгорающий	Сильнодымящий
Органит 11Т	Сгорающий	Сильнодымящий
Органит 12Т	Трудносгорающий (при толщине 0,5 мм); самозатухающий (при толщине 2,0 мм)	Сильнодымящий
Органит 15Т	Трудносгорающий	Среднедымящий
Органит 16Т	Трудносгорающий (при толщине 1,0 мм); самозатухающий (при толщине 2,0 мм)	Существеннодымящий (при толщине 1,0 мм); сильнодымящий (при толщине 2,0 мм)
ВКО-25	Сгорающий (при толщине 0,5 и 1,8 мм)	Сильнодымящий

Как видно из представленных данных, к группам трудносгорающих и самозатухающих материалов относится органопластик Органит 15Т на основе фенольного связующего ФП-520, органопластик Органит 7Т на основе эпоксиформальдегидного связующего 5-211-БН и органопластики Органит 12Т и Органит 16Т на основе модифицированных эпоксидных связующих ЭДТ-69Н и ВС-2526К.

К группе сгорающих материалов относятся органопластики Органит 10Т, Органит 11Т и ВКО-25 на основе эпоксидных связующих марок УП-2227, ВК-36РТ и ВСЭ-34.

Как видно из данных табл. 4, по параметру «дымообразование» органопластики Органит 7Т, Органит 10Т, Органит 11Т, Органит 12Т, Органит 16Т и ВКО-25 относятся к группе сильнодымящих материалов. Основная область применения органопластиков этих марок – элементы внешнего контура летательных аппаратов и детали, на которые не распространяются требования по параметру «дымообразование». Органопластик Органит 7Т широко используется в конструкциях вертолетов для изготовления обшивки сотовых панелей фюзеляжа, руля, кия и стабилизатора. Из органопластика Органит 11ТЛ изготавливают обшивки хвостовых отсеков несущих винтов вертолетов. Органопластик Органит 12Т применяется в конструкциях самолетов для изготовления зализов крыла, обшивок элеронов, закрылков, форкиля, а также в конструкциях вертолетов для изготовления обшивок фюзеляжа и рулевых винтов. Типовые конструкции из органопластика Органит 10Т – это зализы крыла, обтекатели механизма закрылков, обшивки элерона самолетов.

Однако для ряда деталей летательных аппаратов требование к параметру «дымообразование» является определяющим. К ним относятся мало- и средненагруженные элементы интерьера, обшивки и монолитные детали внутреннего набора вертолетов и самолетов. Применение материалов, отвечающих требованиям по параметру «дымообразование», для изготовления таких деталей является необходимым условием для проектирования и изготовления конструкций вертолетов, соответствующих требованиям ЕНЛГС.

Известно, что для повышения пожаробезопасности изделий из полимерных композиционных материалов (снижения образования дыма) существует несколько научно-технических подходов: модификация химического строения полимерной матрицы с целью снижения ее теплотворной способности (теплоты сгорания), применение специальных покрытий, введение в состав полимерной матрицы добавок – антипиренов, повышающих стойкость к горению и т. д.

Для конструкций интерьера летательных аппаратов разработан модифицированный органопластик Органит 7ТЛ-БК, обладающий значительно сниженным дымовыделением по сравнению с базовым органопластиком Органит 7Т. Снижение дымовыделения при горении органопластика Органит 7ТЛ-БК достигнуто благодаря введению в состав полимерного связующего марки 5-211-БН борорганического химического соединения – продукта ОД-18. Путем модификации полимерной матрицы органопластика Органит 7Т борорганическим соединением достигнуто снижение выделения дыма и группы органопластика, показанное в табл. 5.

Таблица 5

Дымообразование органопластиков Органит 7Т и Органит 7ТЛ-БК

Материал	Толщина, мм	Дымообразование	
		характеристика по дымообразованию	условный номер группы
Органит 7Т	1,0	Сильнодымящий	5
	Более 1,0	Сильнодымящий	5
Органит 7ТЛ-БК	1,0	Среднедымящий	3
	Более 1,0	Существеннодымящий	4

На рис. 2 и 3 показаны зависимости параметров пожаробезопасности (продолжительность остаточного горения, высота прогорания) от толщины образцов для органопластиков на основе различных эпоксидных связующих.

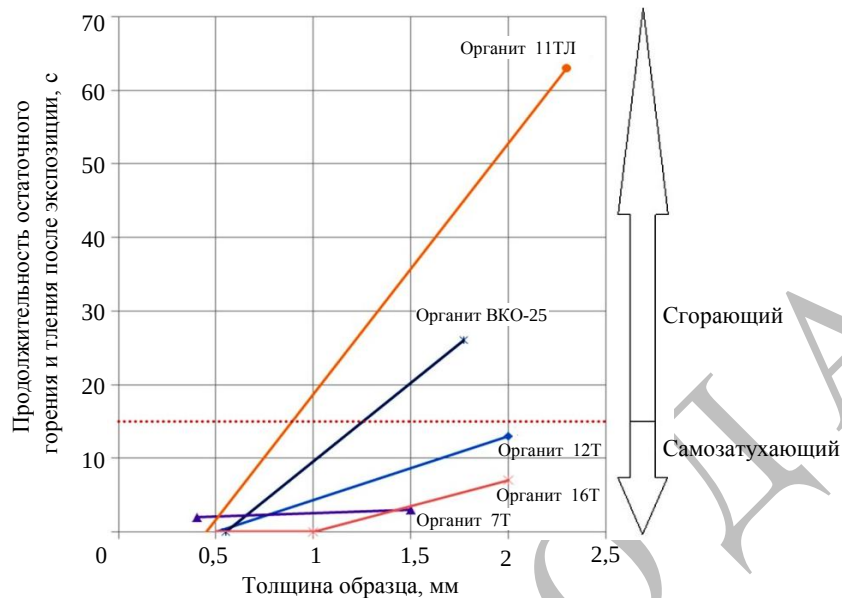


Рис. 2. Влияние толщины образца на продолжительность остаточного горения и тления для органопластиков на основе эпоксидных связующих

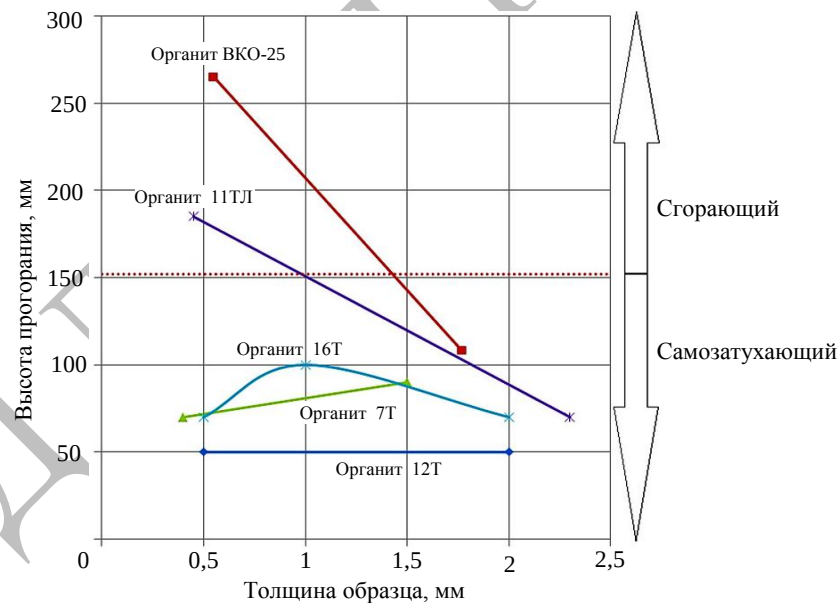


Рис. 3. Влияние толщины на высоту прогорания образцов органопластиков на основе эпоксидных связующих

Установлено, что состав эпоксидного связующего оказывает определяющее влияние на горючесть органопластика. Наиболее устойчивы к горению органопластики Органит 7Т, Органит 12Т и Органит 16Т на основе модифицированных эпоксидных связующих, в состав которых входит фенолформальдегидная смола (связующее 5-211-БН для органопластика Органит 7Т), бромсодержащие эпоксидные смолы (связующее ЭДТ-69Н

для органоластика Органит 12Т), тетрафункциональная хлорсодержащая смола (связующее ВС-2526К для органоластика Органит 16Т). Данные сведения свидетельствуют о возможности совершенствования параметров пожаробезопасности арамидных органоластиков в соответствии с требованиями к перспективной авиационной и космической технике.

Заключения

Проведен анализ устойчивости к горению (ОСТ1 90094–79; АП-25, Приложение F, Часть I) конструкционных органоластиков, армированных тканями на основе российских арамидных волокон СВМ и Русар НТ. Установлено, что армирующая ткань из арамидных волокон относится к категории самозатухающих материалов. Устойчивость к горению конструкционных органоластиков зависит преимущественно от типа связующего, используемого в их составе, а также от толщины испытываемых образцов.

К категории самозатухающих материалов (при толщине образца 2 мм) относятся органоластики Органит 7Т, Органит 12Т и Органит 16Т на основе модифицированных эпоксидных связующих 5-211БН, ЭДТ-69Н и ВС-2526К. Наибольшую стойкость к горению имеет органоластик Органит 15Т, в составе которого использовано фенольное связующее ФП-520 и который относится к группе трудносгорающих материалов.

Органоластики Органит 10Т, Органит 11Т и ВКО-25 на основе эпоксидных смол марок УП-2227, ВК-36РТ и ВСЭ-34 входят в группу сгорающих материалов.

В отношении пожаробезопасности основным недостатком исследованных арамидных органоластиков является повышенное выделение дыма при горении – органоластики марок Органит 7Т, Органит 10Т, Органит 11Т, Органит 12Т, Органит 16Т и ВКО-25 относятся к категории сильнодымящих материалов.

Применение арамидных органоластиков в авиационных конструкциях осуществляется с учетом их пожаробезопасности. Для внешнего контура летательных аппаратов предназначены органоластики Органит 11ТЛ, ВКО-25 и Органит 10Т (обшивки хвостовых отсеков несущих винтов вертолетов, обшивки трехслойных сотовых панелей планера и др.), для внутреннего набора – органоластики Органит 12Т, Органит 16Т и Органит 15Т.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности дальнейшего совершенствования авиационных органоластиков с позиции устойчивости к горению с целью удовлетворения постоянно возрастающих требований, предъявляемых к современной технике.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
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. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 408 с.
5. Барботько С.Л., Вольный О.С., Шуркова Е.Н. Построение феноменологической модели, описывающей изменение характеристики горючести (продолжительности остаточного горения) в зависимости от толщины полимерного материала // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

6. Тимошков П.Н. Современные полимерные композиционные материалы для применения в авиационной технике // III Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: ВИАМ, 2018. С. 40–56, 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3. С. 56–63.
8. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Балышко И.В., Гинзбург Б.М., Кирик Е.В., Точильников Д.Г. Характеристики органопластиков на основе фенольной матрицы и оксоланового волокна // Вопросы материаловедения. 2006. № 2. С. 113–118.
9. Венедиктова М.А., Евдокимов А.А., Краснов Л.Л., Петрова А.П. Исследование возможности применения огнезащитной пасты для повышения пожаробезопасности конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
10. Барботько С.Л., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Скрылев Н.С. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов для внешнего контура авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 56–59.
11. Кириенко О.А., Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Барботько С.Л. Оценка пожарной безопасности ПКМ при распространении пламени по горизонтальной поверхности в условиях теплового потока переменной интенсивности // Труды ВИАМ. 2015. № 6. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-11-11.
12. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
13. 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: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
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: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
15. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е., Бова В.Г., Войнов С.И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 43–46.
16. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Образцова Е.П. Материалы для звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72.

References

1. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
2. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
3. 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.
4. Barbotko S.L., Volny O.S., Kirienko O.A., Shurkova E.N. *Evaluation of fire safety of polymeric materials for aviation purposes*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 408 p.
5. Barbotko S.L., Volny O.S., Shurkova E.N. Creation of the phenomenological model describing change of the characteristic of combustibility (duration of residual burning) depending on thickness of polymeric material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.

6. Timoshkov P.N. Modern polymer composite materials for use in aviation technology. *III All-Rus. sci.-tech. conf. "Polymer composite materials and production technologies of a new generation"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 40–56.
7. Barbotko S.L., Kirillov V.N., Shurkova E.N. Fire safety evolution for polymer composites of aeronautical application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012. no. 3, pp. 56–63.
8. Anisimov A.V., Bakhareva V.E., Balyshko I.V., Ginzburg B.M., Kirik E.V., Tochilnikov D.G. Characteristics of organoplastics based on a phenolic matrix and oxolane fiber. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 2, pp. 113–118.
9. Venediktova M.A., Evdokimov A.A., Krasnov L.L., Petrova A.P. Research of possibility of application of fireproof paste for increase of fire safety of designs from polymeric composite materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-67-75.
10. Barbotko S.L., Shurkova E.N., Volny O.S., Skrylyov N.S. Evolution of polymer composite fire-safety for the outer contour of aeronautical engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. 1, pp. 56–59.
11. Kirienko O.A., Shurkova E.N., Volny O.S., Barbotko S.L. Assessment of fire safety of PCM at flame distribution on horizontal surface under conditions of heat flow of variable intensity. *Trudy VIAM*, 2015, no. 6, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-11-11.
12. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
13. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., 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 20, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
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 20, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
15. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Chernykh T.E., Bova V.G., Voinov S.I. Aramid fibers of the third generation Rusar NT for reinforcing organotextolites for aviation purposes. *Plasticheskiye massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–46.
16. Shuldeshov E.M., Kraev I.D., Obratsova E.P. Materials for sound-proof designs of aircraft engines (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 20, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-59-72.

Информация об авторах

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

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

Кулагина Галина Серафимовна, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Аюпов Тимур Ринатович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

Timur R. Ayupov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.02.2022.

The article was submitted 15.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 21.02.2022.

Научная статья

УДК 621.357.74

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ Sn–Zn–Fe НА ГРАНИЦЕ ГАЛЬВАНОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ ЦИНК–ОЛОВО И СТАЛИ 30ХГСА С ВЫСОКОЙ ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Л.И. Закирова¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹, Д.А. Мовенко¹, А.Б. Лаптев¹

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

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований диффузионного слоя на границе раздела «покрытие–подложка» двухслойных электролитических покрытий Zn–Sn на стали в исходном состоянии и после термического воздействия различной длительности. Глубина диффузионного слоя и, следовательно, концентрация внедренных атомов цинка и олова существенно зависят от продолжительности выдержки во время термообработки при температуре 210 °С. Показано, что с увеличением времени выдержки коэффициент диффузии Zn и Sn в диффузионном слое уменьшается, а коррозионная стойкость и защитная способность повышаются.

Ключевые слова: гальванотермическое покрытие, термическая обработка, диффузионный слой Sn–Zn–Fe, коэффициент диффузии, защитная способность, сталь 30ХГСА

Для цитирования: Закирова Л.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Мовенко Д.А., Лаптев А.Б. Особенности формирования диффузионного слоя Sn–Zn–Fe на границе гальванотермического покрытия системы цинк–олово и стали 30ХГСА с высокой защитной способностью // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 06. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.

Scientific article

FEATURES OF THE FORMATION OF THE Sn–Zn–Fe DIFFUSION LAYER AT THE BORDER OF GALVANOTHERMAL COATING OF SYSTEMS ZINC–TIN AND 30HGSA STEEL WITH HIGH PROTECTIVE CAPABILITY

L.I. Zakirova¹, A.N. Afanasyev-Khodykin¹, D.A. Movenko¹, A.B. Laptev¹

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

Abstract. The results of experimental studies of the diffusion layer at the «coating–substrate» interface of two-layer Zn–Sn electrolytic coatings on steel in initial state and after thermal exposure of various durations are presented. The depth of the diffusion layer and, consequently, the concentration of embedded zinc and tin atoms strongly depends on the holding time during heat treatment at a temperature of 210 °C. It is shown that with increasing exposure time, the diffusion coefficient of Zn and Sn in the diffusion layer decreases, and corrosion resistance and protective ability increase.

Keywords: galvanothermal coating, heat treatment, Sn–Zn–Fe diffusion layer, diffusion coefficient, protective ability, 30HGSA steel

For citation: Zakirova L.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Movenko D.A., Laptev A.B. Features of the formation of the Sn–Zn–Fe diffusion layer at the boundary of galvanothermal coating of systems zinc–tin and 30HGSA steel with high protective capability. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 06. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-61-71.

Введение

Борьба с коррозией имеет особое значение в промышленно развитых странах с большим металлофондом [1–5]. Для обеспечения долговечности изделий и деталей машин поверхность металлических материалов должна быть защищена от коррозии [6].

Широкое распространение для защиты от коррозии в машиностроении получили защитные металлические покрытия, наносимые электролитическими методами [7]. Цинковые покрытия – наиболее распространенные покрытия, используемые для защиты стальных деталей, эксплуатируемых во всеклиматических условиях [8].

Защита цинка от коррозии зависит не только от толщины покрытия, но и от состава и микроструктуры покрытия. С целью повышения коррозионной стойкости цинковых покрытий их легируют металлами подгруппы железа (Fe, Co, Ni, Sn). Исследования композиций Zn–Fe, Zn–Ni, Zn–Co и Zn–Sn показали, что такие покрытия имеют более высокую противокоррозионную защиту, чем нелегированное цинковое покрытие [9].

Гальванические покрытия сплава Zn–Sn показали хорошую коррозионную устойчивость и защитную способность по сравнению с другими сплавами цинка [10].

В научно-технической литературе имеются сведения о способе повышения стойкости к коррозии и увеличения продолжительности действия защиты металла цинковым покрытием, модифицированным введением слоев других металлов – например, никеля или олова перед цинкованием, или олова после нанесения цинкового покрытия [11, 12].

Для нанесения покрытий с оптимальными для каждого конкретного случая функциональными характеристиками необходимо иметь четкие и по возможности полные представления об их структуре, учитывать внутреннее строение покрытий и природу происходящих структурно-фазовых превращений при их получении, а также изменение свойств поверхностных слоев после электролиза и термической обработки.

Электролитическое осаждение представляет собой электрокристаллизацию металлов на поверхности подложки и является сложной электрохимической реакцией, связанной с образованием новой фазы на поверхности катода (подложки). В результате протекания электрокристаллизации совершается фазовый переход из ионного состояния (раствор солей металлов) в кристаллическое (катодный осадок – покрытие).

При росте кристаллов осаждаемого металла на подложке возникают некоторые побочные эффекты – в частности, хаотичный рост кристаллов приводит к появлению внутренних напряжений в покрытии, химической неоднородности и слоистости покрытия.

В электроосажденных металлах третьей группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева вследствие низких температур их плавления процессы релаксации внутренних напряжений сжатия протекают уже при комнатной температуре. Однако внутренние напряжения достигают приемлемых минимальных значений за достаточно длительное время естественного старения. Как показывает анализ научно-технических литературных данных, снятие внутренних напряжений сжатия в осажденных покрытиях из металлов третьей группы за приемлемое время достигается отжигом при температуре от 100 до 150 °С продолжительностью от 1,5 до 2 ч, который активизирует релаксационные процессы [7].

При гомогенизационном (диффузионном) отжиге главным является процесс устранения химической неоднородности, возникающей при электрокристаллизации. Химическая неоднородность электролитических сплавов выражается в слоистости структуры и наличии градиента концентрации по толщине осадка, появлении неравновесных избыточных фаз, включении в осадок примесей, содержащихся в промышленных электролитах.

В статье [13] показано, что гальванотермическое покрытие системы цинк–олово, сформированное по двухступенчатому режиму термообработки (ТО): 150 °С, 2 ч (для снятия внутренних напряжений сжатия) + 210 °С, 4 ч (для устранения неоднородности и слоистости металлических слоев цинка и олова и образования диффузионных слоев между слоями и подложкой), – обладает самой высокой защитной способностью (>19000 ч) для образца с надрезом до стальной подложки [14]. Проведен рентгенофазовый анализ данного покрытия и сделано предположение, что результатом высокой защитной способности является образование диффузионного сплава на стальной подложке системы Sn–Zn–Fe. Несмотря на то что при данном режиме ТО слоистость покрытия нарушается, образование в оловянном слое двух фаз (сплавов заэвтектического и доэвтектического составов) приводит к появлению в поверхностном слое областей с разными стационарными потенциалами, снижающими термодинамическую стабильность. Поэтому весьма актуальным является исследование причины такой высокой защитной способности.

Образование новой фазы на подложке при электрокристаллизации, а также при дальнейшем диффузионном отжиге представляет интерес с точки зрения изучения диффузионных процессов в бинарных системах [15]. Именно начальные стадии электрокристаллизации влияют на формирование текстуры, размер кристаллитов, количество дефектов, а следовательно, и на механические свойства электроосажденных пленок [16].

При электрокристаллизации диффузионные процессы происходят при формировании растущей пленки на начальных стадиях нуклеации. При этом атом может диффундировать в подложку, тем самым образуя новую фазу, которая состоит из атомов подложки и атомов кристаллизующегося на подложке металла [15].

Режимы ТО существенным образом определяют коррозионные свойства гальванотермического покрытия системы Zn–Sn [14], которая относится к эвтектическому типу без образования промежуточных фаз. Растворимость при температуре 200 °С олова в цинке составляет 0,06–0,10 % (атомн.), а цинка в олове: 0,582 % (атомн.). Эвтектика образуется при температуре 198,5 °С и концентрации 85,1 % (атомн.) олова [17].

На адгезию и коррозионную стойкость гальванических покрытий в большей степени влияет переходный слой между подложкой и покрытием, структура которого полностью определяется начальными стадиями кристаллизации и последующей ТО.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований диффузионного слоя на границе раздела «покрытие–подложка» электролитических двухслойных покрытий Zn–Sn на стальной подложке без ТО и с различными режимами ТО.

Получены коэффициенты диффузии атомов цинка и олова в среднеуглеродистой стали 30ХГСА.

Исследовано влияние диффузионного слоя системы Sn–Zn–Fe на защитную способность покрытия.

Материалы и методы

Для проведения исследования использовали образцы из стали 30ХГСА с пределом прочности $\sigma_b = 1450 \pm 50$ МПа. Для приготовления электролитов применяли химикаты квалификации «х.ч.».

Слой цинка и олова получали с применением постоянного тока. Для электроосаждения цинка использовали водный раствор аммонийного электролита с блескообразующей добавкой ЦКН-3 при температуре электролита 20 °С, а для олова – стандартный электролит при температуре 70 °С. Цинк и олово наносили при плотности тока 1 А/дм².

Стальные образцы обезжиривали электрохимически в стандартном щелочном растворе, содержащем жидкое стекло, при температуре электролита 65 °С и плотности тока 4 А/дм² в течение 10 мин, затем промывали в водопроводной воде. Толщина осажденного двухслойного покрытия составила 6 мкм.

Термообработку образцов с покрытием проводили в воздушной среде в сушильном шкафу FD 115 Binder.

Защитную способность покрытий в среде хлоридов определяли методом ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) по ГОСТ 9.308–85 при температуре 35±2 °С и относительной влажности 95 % при непрерывном распылении нейтрального 5%-ного водного раствора хлористого натрия.

Анализ структуры и определение локального элементного состава покрытий проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015 на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-Max, при ускоряющем напряжении 25 кВ и токе пучка 5 нА. Получены изображения структуры образцов в поперечном сечении в режиме отраженных электронов.

Анализ и обработка данных выполнены с применением программного обеспечения AZtec 2.3.

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

Результаты и обсуждение

В настоящее время для изучения диффузии в твердых телах существует немало количество физических и физико-химических методов исследования [18]. Эти методы основаны на измерении распределения концентрации диффундирующего вещества в исследуемом образце.

Для изучения формирования диффузионного слоя системы Fe–Zn–Sn и его влияния на коррозионную стойкость и защитную способность выбраны образцы с двухслойным покрытием толщиной 4 мкм Zn + 2 мкм Sn, которое наносили на сталь анодного (по отношению к стали) цинка толщиной в 2 раза больше, чем второй слой олова, который является катодным по отношению к цинку. Олово наносили как для легирования цинкового покрытия, так и для повышения защитной способности всего покрытия [19–22]. Термообработку проводили при температуре 210 °С с временем выдержки 2, 10, 60 и 240 мин [13].

Для определения структуры переходного слоя на границе раздела «покрытие–подложка» проведен элементный химический анализ на содержание атомов осаждаемых цинка и олова, а также железа из стальной подложки. Исследования проводили на шлифах в направлении, перпендикулярном границе раздела, с шагом 0,5 и 1 мкм. Область исследования распространялась на 6–8 мкм от границы раздела в зависимости от режима ТО покрытий. В табл. 1 приведены изображения структуры образцов с покрытием в поперечном сечении. Указаны линии профиля и соответствующее изменение элементного состава по линии.

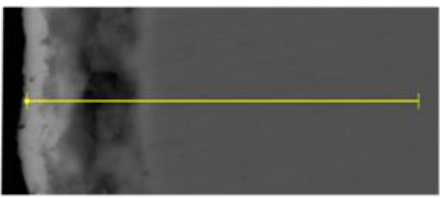
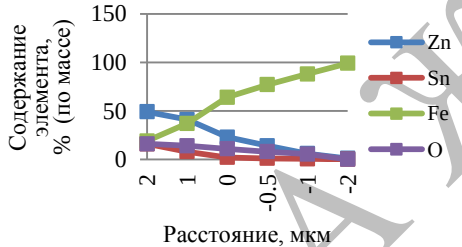
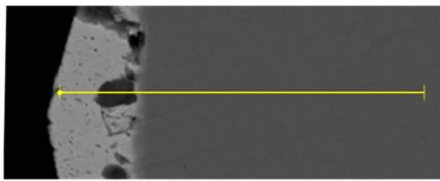
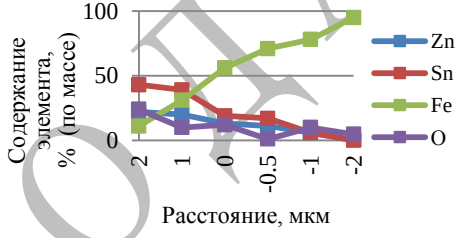
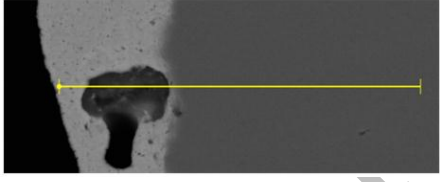
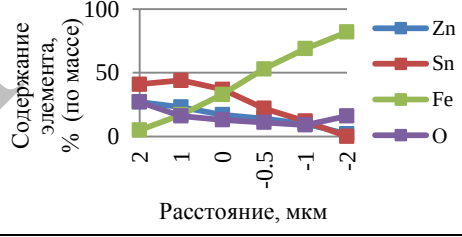
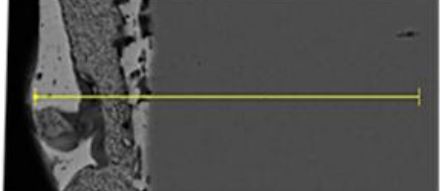
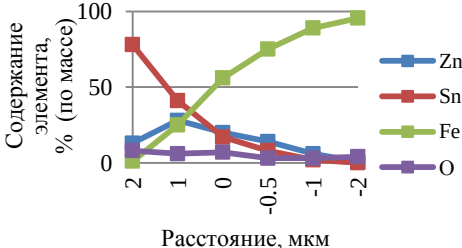
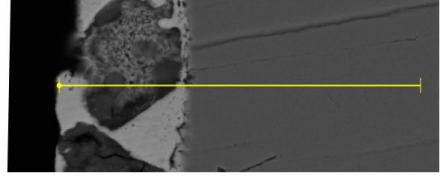
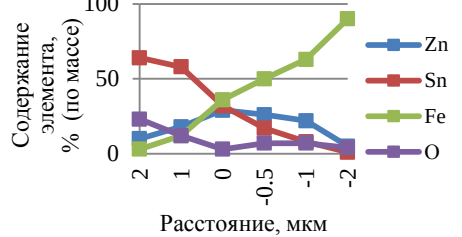
Анализ процесса диффузии проводили по трем основным элементам – Zn, Sn и Fe. Линию профиля проводили от осажденной пленки олова через цинковое покрытие и вглубь подложки. Начало отсчета $x = 0$ соответствует границе раздела «покрытие–подложка».

Из полученных данных (табл. 1) можно сделать вывод о том, что при электроосаждении происходит диффузионное взаимодействие между элементами покрытия и поверхностью основного металла, в результате которого атомы цинка и олова диффундируют в металл подложки, образуя переходный диффузионный слой. Причем после

ТО из-за малой взаимной растворимости олова и цинка, а также слабых межатомных связей и повышенной концентрации межузельных атомов в электроосажденных цинке и олове при их взаимной диффузии образуются сплавы внедрения [23].

Таблица 1

Анализ изменения содержания элементов в образцах с покрытием Ц402 системы Zn–Sn при различных режимах термообработки (ТО)

Продолжительность ТО, мин		
Без ТО		
2		
10		
60		
240		

Из результатов, представленных в табл. 1, видно, что атомы цинка и олова при электрокристаллизации постоянным током ($i = 1 \text{ А/дм}^2$) проникают на глубину от 1 до 2 мкм после проведения ТО, т. е. имеет место диффузия как цинка и олова в железо на глубину до 2 мкм, так и железа в цинк и олово. После ТО двухслойного покрытия системы Zn–Sn при температуре выше эвтектической (198,5–210 °С) при различных

интервалах выдержки также происходит диффузия атомов олова в цинк и далее в стальную подложку до 2 мкм.

Коэффициенты диффузии при электроосаждении и после термообработки

Экспериментальное определение коэффициента диффузии (D) обычно сводится к анализу зависимости концентрации диффундирующего элемента (C) от глубины проникновения x [18].

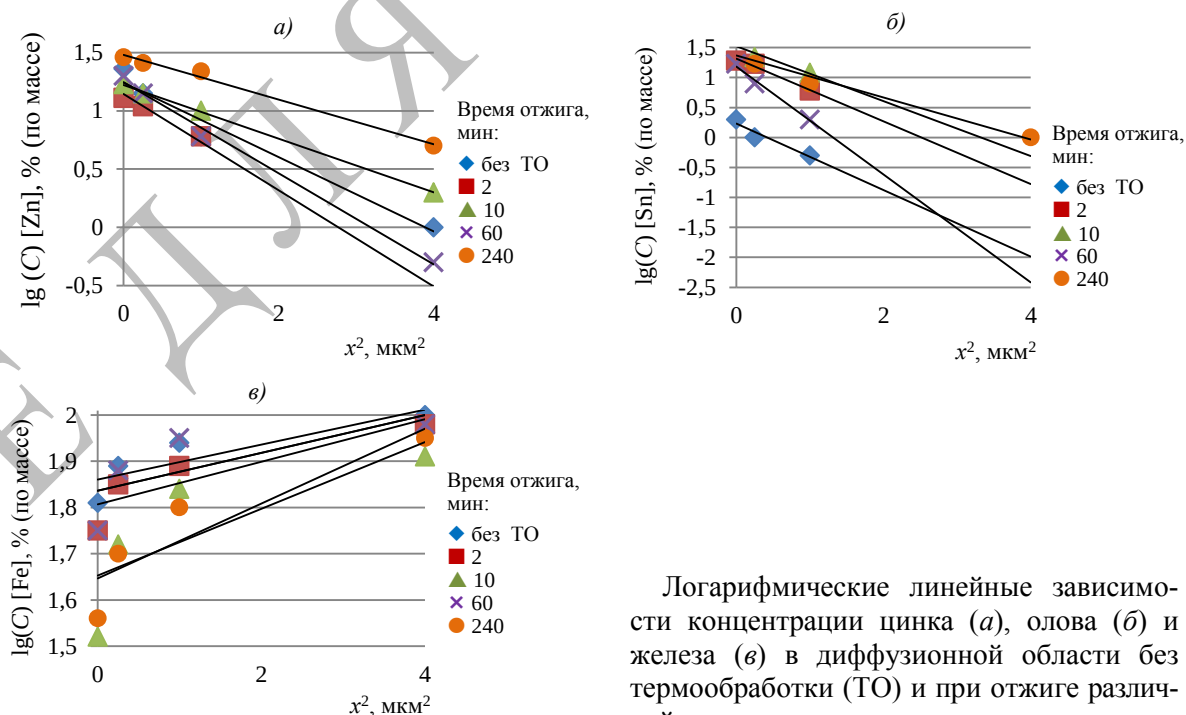
Для определения коэффициента диффузии (D) построены зависимости распределения атомов цинкового и оловянного покрытий в диффузионной зоне в виде функции $\lg(C) = f(x^2)$. Коэффициенты диффузии определяли методом, предложенным в патенте [24], по формуле

$$D = \frac{1}{4\tau \cdot \operatorname{tg} \alpha},$$

где τ – время стимулирующего диффузию воздействия; α – угол наклона зависимости $\lg(C) = f(x^2)$.

Угол α определяли экспериментально. Время стимулирующего диффузию воздействия (τ) для образца с покрытием без ТО также определяли экспериментально как время, за которое растущая пленка олова покрывала всю поверхность катода с первым цинковым слоем. Поскольку осаждение олова происходит в горячем электролите при температуре 70 °С, диффузия между цинком, оловом и стальной подложкой проходит уже во время осаждения олова. Для образцов с ТО определяли время проведения изотермического отжига.

На рисунке приведены логарифмические зависимости концентрации атомов цинка, олова и железа в диффузионном слое стальной подложки для различных режимов ТО от x^2 . Значения коэффициента диффузии цинка и олова в железе, а также железа в цинке и олове приведены в табл. 2.



Логарифмические линейные зависимости концентрации цинка (а), олова (б) и железа (в) в диффузионной области без термообработки (ТО) и при отжиге различной продолжительности

Таблица 2

**Значения коэффициента диффузии (D) цинка и олова в железе,
а также железа в цинке и олове при температуре обработки 210 °С**

Элементарные слои	Продолжительность термообработки (ТО), мин	Время стимулирующего воздействия, с	$D \cdot 10^{10}$, м ² /с
Fe	Без ТО	60	3,79
	2	120	0,902
	10	600	0,128
	60	3600	0,039
	240	14400	0,477
Zn	Без ТО	60	0,786
	2	120	0,298
	10	600	0,1
	60	3600	0,011
	240	14400	0,005
Sn	Без ТО	60	0,85
	2	120	0,44
	10	600	0,099
	60	3600	0,0089
	240	14400	0,0054

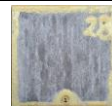
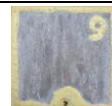
При ТО диффузионное перемещение атомов тесно связано с наличием в кристалле дефектов – в первую очередь вакансий. Коэффициент диффузии пропорционален концентрации вакансий [25].

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что коэффициент диффузии цинка и олова с увеличением времени выдержки ТО при температуре 210 °С уменьшается. Можно сделать вывод, что количество дефектов уменьшается и происходит насыщение поверхностного слоя, которое сильно замедляет диффузию.

В табл. 3 представлены результаты коррозионных испытаний образцов как с термообработкой, так и без термообработки.

Таблица 3

**Ускоренные коррозионные испытания в камере солевого тумана (КСТ) образцов
после термообработки (ТО) при температуре 210 °С с различным временем выдержки**

Условный номер образца	Продолжительность ТО, мин	Внешний вид образцов после испытания в КСТ в течение, ч						
		в исходном состоянии	24	48	168	432	960	2952
1	Без ТО							
2	2							
3	10							
4	60							
5	240							

Коррозия покрытия на образце 1 без ТО наблюдается через 24 ч, также небольшое количество продуктов коррозии покрытия присутствует и на покрытии с ТО при температуре 210 °С и минимальным временем выдержки 2 мин. На остальных образцах коррозия покрытия начинается через 168 ч.

Небольшие проявления коррозии стали в виде питтинга в количестве от 1 до 2 шт. наблюдаются на образце 1 без термообработки через 960 ч, а на образце 2 с меньшим временем выдержки (2 мин) – через >2900 ч. На остальных образцах продукты коррозии стали не обнаружены.

Продукты коррозии на образце без ТО более объемные, чем на образцах с ТО. По-видимому, это связано с тем, что цинк корродирует через поры и дефекты оловянного покрытия.

Заключения

Установлено, что при нанесении покрытия системы Zn–Sn на стальную подложку и последующей термообработке при температуре 210 °С по мере увеличения выдержки нарушается слоистость и пористость покрытия, происходит образование в оловянном слое двух фаз – цинк-оловянных сплавов заэвтектического и доэвтектического составов, снижается дефектность подложки из-за заполнения дефектных областей атомами цинка и олова.

Исследования переходного слоя на границе раздела «покрытие–подложка», образованного электроосаждением пленок цинка и олова на стальной подложке без последующей ТО, показали, что в переходном слое происходит диффузия осаждаемого цинкового покрытия в материал подложки. Второй оловянный слой диффундирует в цинковое покрытие еще при его нанесении на цинк.

Глубина диффузионного слоя и, следовательно, концентрация внедренных атомов цинка и олова зависят от продолжительности выдержки. С увеличением времени выдержки с 2 до 240 мин значения коэффициентов диффузии цинка и олова уменьшаются в результате уменьшения количества дефектов покрытия.

Показано, что ТО приводит к появлению цинка в поверхностном оловянном слое и увеличению электрохимической неоднородности поверхности, т. е. к образованию областей с разными стационарными потенциалами, снижающими термодинамическую стабильность.

На образцах без ТО происходит образование объемных поверхностных слоев продуктов коррозии цинка. По мере увеличения времени ТО количество рыхлых продуктов коррозии уменьшается, и образуются более плотные слои с низкой проницаемостью, которые служат барьером для проникновения коррозионно-активных элементов к поверхности стальной подложки и обеспечивают длительную защиту от коррозии в условиях атмосферы.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозивности приморских атмосфер // Коррозия: материалы, защита. 2016. № 1. С. 1–15.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.

4. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.11.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
5. Лось И.С., Перельгин Ю.П., Розен А.Е., Киреев С.Ю. Многослойные коррозионностойкие материалы. 2-е изд., доп. Пенза: Изд-во ПГУ, 2015. 128 с.
6. Ямпольский А.М. Защитные покрытия металлов. Л.: Лениздат, 1958. 135 с.
7. Ковенский И.М., Поветкин В.В. Металловедение покрытий: учебник для вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 1999. 296 с.
8. ASTM F1941. Standard specification for electrodeposited coatings on mechanical fasteners, inch and metric. ASTM International, 2016. 14 p.
9. Zaki N. Zinc alloy plating // *ASM Handbook*. Ohio: ASM International, 1994. Vol. 5: Surface Engineering / eds. C.M. Cotell, J.A. Sprague, Jr.F.A. Smidt. P. 264–265.
10. Mechanical plating with tin-cadmium alloy // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 1978. Vol. 25 (3). P. 8–9.
11. Corrosion resistant coating system and method: pat. US6613452B2; filed 18.07.02; publ. 02.09.03.
12. Process for producing a thin tin and zinc plated steel sheet: pat. CA1211407A; filed 23.09.82; publ. 16.09.86.
13. Закирова Л.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Мовенко Д.А., Лаптев А.Б. Особенности формирования гальванотермического покрытия системы цинк–олово с высокой защитной способностью на деталях из углеродистых сталей // *Коррозия: материалы, защита*. 2021. № 11. С. 39–48. DOI: 10.31044/1813-7016-2021-0-11-39-48.
14. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И., Вдовин А.И. Сравнительная оценка защитной способности гальванотермического покрытия системы цинк–олово и кадмиевого покрытия в среде хлоридов // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 5. С. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
15. Штапенко Э.Ф., Заблудовский В.А., Дудкина В.В. Диффузия на границе «пленка–подложка» при электрокристаллизации цинка на медной подложке // *Физика металлов и материаловедение*. 2015. Т. 116. № 3. С. 1–6.
16. Поветкин В.В., Ковенский И.М. Структура электролитических покрытий. М.: Металлургия, 1989. 135 с.
17. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 992 с.
18. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: Мир, 2002. 376 с.
19. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
20. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
21. Dubent S., Mertens M.L.A.D., Saurat M. Electrodeposition, characterization and corrosion behaviour of Tin–20 wt. % zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 120 (2–3). P. 371–380.
22. Киреев С.Ю., Перельгин Ю.П., Киреев А.Ю. Свойства электролитических покрытий сплавом олово–цинк для гетероструктур изделий приборостроения // *Технические науки. Машиностроение и машиноведение*. 2009. № 2 (10). С. 201–208.
23. Ковенский И.М. Отжиг электроосажденных металлов и сплавов. Тюмень: ТюмГНГУ, 1995. 92 с.
24. Способ определения коэффициентов диффузии в пленочных материалах: пат. 2212027С1 Рос. Федерация; заявл. 18.04.02; опубл. 10.09.03.
25. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. М.: Металлургия, 1974. 280 с.

References

1. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 2. New approaches to assessing the corrosiveness of coastal atmospheres. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2016, no. 1, pp. 1–15.
2. 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.
3. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 20, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
5. Los I.S., Perelygin Yu.P., Rozen A.E., Kireev S.Yu. *Multilayer corrosion-resistant materials*. 2nd ed. Penza: PGU, 2015, 128 p.
6. Yampolsky A.M. *Protective coatings of metals*. Leningrad: Lenizdat, 1958, 135 p.
7. Kovensky I.M., Povetkin V.V. *Metal science of coatings: textbook for universities*. Moscow: Internet Engineering, 1999, 296 p.
8. ASTM F1941. *Standard specification for electrodeposited coatings on mechanical fasteners, inch and metric*. ASTM International, 2016, 14 p.
9. Zaki N. Zinc alloy plating. *ASM Handbook*. Ohio: ASM International, 1994. Vol. 5: Surface Engineering / eds. C.M. Cotell, J.A. Sprague, Jr.F.A. Smidt, pp. 264–265.
10. Mechanical plating with tin-cadmium alloy. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 1978, vol. 25 (3), pp. 8–9.
11. *Corrosion resistant coating system and method*: pat. US6613452B2; filed 18.07.02; publ. 02.09.03.
12. *Process for producing a thin tin and zinc plated steel sheet*: pat. CA1211407A; filed 23.09.82; publ. 16.09.86.
13. Zakirova L.I., Afanasiev-Khodykin A.N., Movenko D.A., Laptev A.B. Peculiarities of the formation of a zinc–tin galvanothermic coating with a high protective ability on parts made of carbon steels. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2021, no. 11, pp. 39–48. DOI: 10.31044/1813-7016-2021-0-11-39-48.
14. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I., Vdovin A.I. Comparative assessment of the protective ability of the galvanothermal coating of the zinc-tin system and cadmium coating in the environment of chlorides. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2020, no. 5, pp. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
15. Shtapenko E.F., Zabudovsky V.A., Dudkina V.V. Diffusion at the "film-substrate" boundary during the electrocrystallization of zinc on a copper substrate. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, vol. 116, no. 3, pp. 1–6.
16. Povetkin V.V., Kovensky I.M. *Structure of electrolytic coatings*. Moscow: Metallurgiya, 1989, 135 p.
17. *Diagrams of the state of binary metal systems: reference book in 3 vols.* ed. N.P. Lyakishev. Moscow: Mashinostroenie, 1996, vol. 1, 992 p.
18. Sluchinskaya I.A. *Fundamentals of materials science and semiconductor technology*. Moscow: Mir, 2002, 376 p.
19. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I. Cadmium replacement. Stage 2 – final. Galvanic thermal coating of zinc–tin system – real alternative to cadmium plating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
20. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.

21. Dubent S., Mertens M.L.A.D., Saurat M. Electrodeposition, characterization and corrosion behavior of Tin–20 wt. % zinc coatings electroplated from a non-cyanide alkaline bath. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, vol. 120 (2–3), pp. 371–380.
22. Kireev S.Yu., Perelygin Yu.P., Kireev A.Yu. Properties of electrolytic coatings with a tin–zinc alloy for heterostructures of instrument making products. *Tekhnicheskie nauki. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye*, 2009, no. 2 (10), pp. 201–208.
23. Kovensky I.M. *Annealing of electrodeposited metals and alloys*. Tyumen: TyumGNGU, 1995, 92 p.
24. *Method for determining diffusion coefficients in film materials*: pat. 2212027C1 Rus. Federation; filed 18.04.02; publ. 10.09.03.
25. Bokshtein B.S., Bokshtein S.Z., Zhukhovitsky A.A. *Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 280 p.

Информация об авторах

Закирова Лилия Ильдусовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Афанасьев-Ходыкин Александр Николаевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Лаптев Анатолий Борисович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lilia I. Zakirova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander N. Afanasyev-Khodykin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Anatoly B. Laptev, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.01.2022.

The article was submitted 30.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 24.01.2022.

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СЕЛЕКТИВНОГО НАНЕСЕНИЯ НА ПЕЧАТНЫЕ УЗЛЫ (обзор)

А.А. Козлова¹, О.В. Кондратьева¹, В.А. Кузнецова¹

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

Аннотация. Проведен анализ публикаций, посвященных разработке электроизоляционных влагозащитных покрытий. Приведены марки отечественных и импортных влагозащитных лаков, применяемых на предприятиях отрасли, а также рассмотрены основные проблемы, возникающие при их использовании в системах автоматического нанесения. Приведены характеристики применяемых отечественных и импортных влагозащитных лаков, указаны их преимущества и недостатки, а также требования к технологическим характеристикам лаков, определяющие возможность их использования в автоматических системах селективного нанесения.

Ключевые слова: влагозащитные покрытия, электроизоляционные лаки, изделия электронной техники, автоматизация, селективное нанесение, УФ-отверждение, конформное покрытие

Для цитирования: Козлова А.А., Кондратьева О.В., Кузнецова В.А. Основные проблемы применения влагозащитных электроизоляционных материалов отечественного производства для автоматизированного селективного нанесения на печатные узлы (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.

Scientific article

THE MAIN PROBLEMS OF USING DOMESTICALLY PRODUCED MOISTURE-PROOF ELECTRICAL INSULATING MATERIALS FOR AUTOMATED SELECTIVE APPLICATION ON PRINTED BOARD ASSEMBLIES (review)

A.A. Kozlova¹, O.V. Kondrateva¹, V.A. Kuznetsova¹

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 analysis of publications devoted to the development of electrical insulating moisture-protective coatings has been carried out. The brands of domestic and imported moisture-proof varnishes used at the enterprises of the industry are given, as well as the main problems arising during their use in automatic application systems are considered. The characteristics of used domestic and import moisture protective varnishes, their advantages and disadvantages, the requirements to the technological characteristics of varnishes determining the possibility of their use in automatic systems for selective application have been given.

Keywords: moisture-proof coatings, electrical insulating varnishes, electronic products, automation, selective application, UV-curing, conformal coating

For citation: Kozlova A.A., Kondrateva O.V., Kuznetsova V.A. The main problems of using domestically produced moisture-proof electrical insulating materials for automated selective application on printed assemblies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-72-83.

Введение

В настоящее время сборка электронных модулей является одной из ключевых технологий промышленного производства, а самым востребованным сегментом рынка стала электроника для военной и аэрокосмической техники.

Более того, согласно стратегии развития электронной промышленности России до 2030 г., запланирован рост отечественного производства более чем в 2,5 раза и увеличение объема гражданского сектора электроники [1]. Однако в российской электронике существует ряд проблем, в том числе связанных с вопросами применения зарубежной продукции и с отсутствием их российских аналогов.

В процессе эксплуатации элементы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) подвергаются температурным перепадам и воздействию влаги. Увеличение влажности воздуха приводит к образованию конденсата влаги, а это может привести к ухудшению диэлектрических свойств изоляционных материалов. Поэтому лакокрасочные материалы, используемые для защиты элементов РЭА, должны быть устойчивыми к воздействию влаги, а также обладать хорошими электроизоляционными свойствами, высокой адгезией к материалам печатной платы и установленным на ней изделиям электронной техники. Выбор того или иного покрытия определяется условиями эксплуатации аппаратуры, а также конструктивно-технологическими параметрами РЭА.

Производители отечественной электронной аппаратуры работают с большим количеством поставщиков комплектующих изделий и материалов. С учетом того, что на качество выпускаемой продукции значительное влияние оказывают характеристики применяемых материалов, в большинстве случаев предпочтение отдается высокотехнологичным материалам с высокими значениями показателей качества.

Так, рынок современных технологичных лакокрасочных покрытий, предназначенных для влагозащиты элементов РЭА и отвечающих всем требованиям стандартов, представлен в основном материалами зарубежного производства. В условиях повышения сложности и миниатюризации электронных изделий возрастает потребность в применении материалов для получения качественных влагозащитных покрытий и современных технологичных методов нанесения. Одним из таких методов является нанесение покрытий в системах селективной влагозащиты.

В данной статье проведен анализ публикаций, посвященных разработке электроизоляционных влагозащитных покрытий, а также рассмотрены основные проблемы, возникающие при использовании их в системах автоматического нанесения отечественных и импортных влагозащитных лаков.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Оборудование и способы нанесения

Для нанесения влагозащитных лакокрасочных покрытий может быть использован любой из существующих методов нанесения таких покрытий: при помощи кисти,

окуванием, валиком, распылителем. Но процесс нанесения влагозащитных покрытий вручную является трудоемким и требует дополнительной изоляции участков, не подлежащих окрашиванию. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки [3].

В условиях отечественной электронной промышленности возрастает значение современного уровня технического вооружения и технологических возможностей производства [4]. Одним из самых перспективных направлений развития методов нанесения влагозащитного покрытия на печатные платы в условиях российской электронной промышленности является метод автоматического селективного нанесения. Селективное нанесение влагозащитных лаков позволяет избирательно покрывать печатные платы в тех местах, где защита от влаги необходима. Основным отличием и одновременно преимуществом этого метода является отсутствие необходимости маскировки платы в тех местах, где нанесение покрытия не предусмотрено. Поскольку в большинстве случаев маскировка производится вручную с помощью пластыря, изоляционной ленты или специально разработанных материалов, то исключение данного этапа из технологического процесса нанесения влагозащиты делает процесс экономически более выгодным.

Современные производители автоматов селективного нанесения покрытия предлагают широкий спектр аппликаторов (головок), реализующих различные методы нанесения материала. Среди них есть как прецизионные – для точного нанесения материала на сложных и труднодоступных участках, так и головки с регулируемой шириной струи для скоростного покрытия печатной платы. Избирательно и точно нанося материал, можно добиться четких контуров покрытия.

Оборудование для селективного нанесения может включать установки с несколькими головками и инверторы для нанесения двухстороннего покрытия. Точное нанесение покрытия на окрашиваемые участки позволяет исключить необходимость применения маскировки и демаскировки схем, что, в свою очередь, позволяет сократить потребление используемого материала, а также минимизировать возможное негативное воздействие человеческого фактора на качество получаемого покрытия, обеспечить повторяемость и прогнозирование результата по заданным параметрам. Для любого типа печатных узлов можно задать программы прохождения напыляющей головки и точек нанесения покрытия на те места печатного узла, которые необходимо подвергнуть тщательной защите.

Одним из самых важных элементов системы нанесения покрытия является дозирующее устройство, обеспечивающее точность нанесения и выпуск качественной продукции. Большая часть видов селективных покрытий может быть нанесена с помощью стандартной тонкодисперсной напылительной головки, программируемой по осям X, Y, Z и по циклам включения и выключения. При большом насыщении печатной платы радиоэлектронными элементами образуется крайне сложная поверхность для нанесения покрытия, поэтому в данном случае необходимо обеспечить равномерное и более точное нанесение покрытия без дефектов, образования пузырей или непрокрасов. Для этих целей может быть использована игольчатая насадка, которая монтируется к той же системе управления и программируется соответствующим образом. Поэтому при работе с лаками необходима качественная промывка системы автоматического нанесения, а жизнеспособность лака должна составлять не менее 8 ч, чтобы также сократить расходы на промывку всей системы.

Мировым лидером по производству автоматического оборудования для селективного нанесения влагозащитных покрытий является компания Nordson ASYMTEK (США). В России аналогов данному оборудованию не выявлено.

Наиболее перспективным способом отверждения покрытий является отверждение под ультрафиолетовым (УФ) излучением. Достоинствами этого способа являются малые затраты энергии, высокие производительность и качество получаемых покрытий. Внедрение лака, отверждаемого при воздействии УФ-излучения, в производство печатных узлов позволит существенно повысить производительность труда и снизить трудоемкость изготовления изделий, а также повысить качество влагозащиты и экологическую безопасность производства.

Современное состояние отечественного рынка влагозащитных покрытий

Основными факторами, обеспечивающими электроизоляционные свойства, являются химическая природа материала пленки, условия формирования и эксплуатации защитных покрытий. По диэлектрическим характеристикам наиболее пригодными считаются покрытия на основе полимеров, не содержащих полярных функциональных групп, и пленкообразователей, имеющих трехмерное строение. Такие покрытия должны иметь хорошие электроизоляционные свойства, длительно сохраняющиеся в процессе эксплуатации в различных условиях.

Для повышения влагостойкости и электроизоляционных свойств ведущими разработчиками полимерных защитных лакокрасочных покрытий для печатных узлов и РЭА применяются пять основных классов полимеров: полиакриловые, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические и париленовые.

Для защиты от воздействия влаги печатных плат наибольшее распространение на российских предприятиях получили: эпоксидно-уретановый лак УР-231 (ТУ6-21-14-90), его менее эффективная по влагозащите модификация УР-231Л (ТУ6-21-14-90), эпоксидные лаки ЭП-730 (ГОСТ 20824-81) и ЭП-9114 (ТУ6-21-3-89). К недостаткам этих материалов можно отнести следующие:

- многокомпонентные системы;
- рабочее время работы с лаком УР-231 составляет не более 4 ч, так как лак быстро набирает вязкость и полимеризуется; при использовании лака в автоматических системах нанесения требуется промывка оборудования каждые несколько часов, что составляет меньше одной рабочей смены;
- эпоксидные лаки содержат в своем составе растворители, способствующие набуханию материала основы печатной платы, что приводит к негативным последствиям [5].

Из зарубежных материалов на рынке широко представлен ряд влагозащитных покрытий марки HumiSeal[®], предназначенных для обеспечения надежной защиты печатных узлов от воздействия влаги, растворителей, солевого тумана и других агрессивных веществ в температурном диапазоне от –65 до +125 °С. Наибольшее применение за рубежом нашли однокомпонентные полиуретановые влагозащитные лаки марок HumiSeal 1A33, HumiSeal 1A68 и HumiSeal 1A20. Однокомпонентный состав этих лаков одновременно является как преимуществом, что определяет возможность их применения на автоматизированных линиях селективного нанесения влагозащиты на печатные платы, так и недостатком, потому как для полного отверждения однокомпонентного полиуретанового покрытия может потребоваться до 10 сут, что является экономически невыгодным.

Основным преимуществом материалов марки HumiSeal[®] является то, что эти материалы являются однокомпонентными. Отечественные лаки не отвечают требованиям автоматизации и не могут обеспечить непрерывный цикл процесса нанесения по причине ограниченной жизнеспособности (до 5 ч), необходимости дозированного смешивания компонентов перед применением и длительной сушки каждого слоя покрытия (не менее 8 ч при температуре 65 °С).

Продолжительное время высыхания покрытий является серьезным недостатком отечественных лаков. С целью сокращения времени высыхания покрытий на основе лака УР-231 проведено исследование свойств лакового покрытия, отвержденного трехфункциональным изоцианатным отвердителем ОС-17 (ТУ2472-608-05121441–2013), в сравнении с серийно применяемым отвердителем диэтиленгликольуретаном (ТУ6-03-388–75). В работе [6] показано, что применение отвердителя ОС-17 позволяет сократить время полимеризации лаковой пленки на 2 ч при сохранении основных эксплуатационных свойств покрытий на основе лака УР-231.

Применение УФ-излучения для отверждения лакокрасочных материалов позволяет сократить время полимеризации и тем самым ускорить технологический процесс нанесения влагозащитных покрытий на электронные модули. Основная проблема заключается в отсутствии отверждения в «теневых» зонах, т. е. в труднодоступных для УФ-лучей местах при большой насыщенности печатных узлов электрорадиоэлементами. В последние несколько лет фотополимеризация стала предметом интенсивных исследований благодаря разработке новых фоточувствительных соединений и развитию новых технологий, таких как светодиоды, излучающие в УФ-спектре. Этот растущий интерес частично мотивирован экономическими и экологическими преимуществами, которые предоставляет эта технология, такими как высокая скорость производства, низкий уровень летучих выбросов и т. д. Один из основных недостатков фотополимеризации был связан с ограниченным диапазоном возможных полимеризуемых мономеров и иницирующих систем. Наиболее часто используемые мономеры и преполимеры основаны на большом разнообразии (мет)акриловых мономеров, которые демонстрируют хорошую реакционную способность [7].

Влагозащитные покрытия марки HumiSeal® ультрафиолетового отверждения не имеют отлипа после УФ-излучения, а вторичное отверждение за счет реакции с влагой воздуха гарантирует полное отверждение любых необлученных участков покрытия.

Американскими специалистами фирм Loctite Corporation и Rockwell Automation Technologies Inc. разработаны УФ-отверждаемое однокомпонентное покрытие, содержащее аллильную группу, метакрилатный мономер и инициатор реакции полимеризации, а также способ нанесения электроизоляционных лаков. Покрытие обладает целым комплексом свойств: длительным жизненным циклом, технологичностью при нанесении, достаточно быстрым высыханием до степени 3, высокими электроизоляционными свойствами, влагостойкостью и стойкостью к высоким температурам, ремонтпригодностью. Интересным решением разработчиков электроизоляционных покрытий этих фирм является создание силиконовых композиций двойного отверждения. В состав композиции входят: реактивный полиорганосилоксан с конечными акрильными функциональными диалкоксисилильными или диарилоксисилильными группами, влагоотверждающий катализатор, силиконовое масло с конечными триметилсилильными группами, фоточувствительный агент, промотор адгезии и наполнители [8, 9].

Учеными фирмы Dow Corning Corp. также уделено большое внимание разработке силоксанов и силанов, отверждаемых органоборанаминовыми комплексами. Силиконовые конформные покрытия отверждаются по двум механизмам: при нагревании с участием реакции гидросилилирования, а также влагой с использованием общепринятой вулканизации при комнатной температуре. Такие покрытия обладают достаточно высокими диэлектрическими свойствами и устойчивостью к абразивному воздействию [10].

Японской фирмой Hitachi Chemical Co Ltd запатентован способ получения фотоотверждаемого, влагостойкого изоляционного покрывного материала для электронного оборудования, обладающего высокой стабильностью, а также хорошими диэлектрическими характеристиками [11].

Большой интерес к разработкам электроизоляционных покрытий радиотехнического назначения проявляют также китайские исследователи, которые разработали конформные покрытия на основе фторсодержащих смол для защиты печатных плат; высокотемпературные высокочастотные конформные покрытия, стойкие к воздействию влаги, а также способ защиты печатных плат с применением конформных покрытий [12, 13].

В работе [14] предложена методика испытаний для контроля выполнения требований по надежности влагозащитных покрытий. Методика позволяет выявить недостатки, а также при необходимости выполнить корректировку процесса.

В отечественной практике [15] предпринята попытка разработки фотополимеризующегося под воздействием УФ-излучения лака УР-231. По результатам исследования установлена возможность ускоренного отверждения лака УР-231 при УФ-излучении при сохранении значений физико-механических характеристик, адгезии и влагостойкости. Но, к сожалению, не все компоненты УФ-отверждаемого лака УР-231 в настоящее время выпускаются промышленностью.

Не оставлен без внимания вопрос автоматизации процесса нанесения лака УР-231. В настоящее время на предприятиях микроэлектронной промышленности при крупносерийном и массовом производстве печатных узлов нанесение влагозащитных электроизоляционных покрытий осуществляется на установках, оснащенных роботизированной системой нанесения лакокрасочных материалов. Изготовители систем дозирования технологичных материалов – испанская компания INNOMELT совместно с российской компанией ООО «АссемРус» и корпорация Nordson (Нидерланды) совместно с российской компанией ООО «Диполь» – осуществили модернизацию своего оборудования: соответственно систем селективной влагозащиты Yamaha YSP10 и DIMA BV под автоматическое нанесение лака УР-231 на печатные узлы [16, 17].

Тем не менее, несмотря на большое количество публикаций, освещающих результаты исследований в области создания влагозащитных покрытий, на российском рынке отсутствуют отечественные влагозащитные материалы, отвечающие современным требованиям по технологическим характеристикам и способности автоматизированного нанесения. Поэтому актуальными остаются вопросы выбора электроизоляционных влагозащитных материалов и технологий их нанесения. Свойства основных применяемых в настоящее время видов влагозащитных покрытий, их конструктивные и технологические особенности, преимущества и недостатки подробно описаны в отечественной научно-технической литературе [18], а также приведены в таблице.

К влагозащитным покрытиям, работающим в сложных условиях эксплуатации, предъявляются высокие требования, регламентируемые ГОСТ Р МЭК 61191-1-2010 «Печатные узлы. Часть 1. Поверхностный монтаж и связанные с ним технологии. Общие технические требования» и ГОСТ Р МЭК 61192-1-2010 «Печатные узлы. Требования к качеству. Часть 1. Общие технические требования». Основным стандартом, применяемым за рубежом, – IPC-CC-830B «Изоляционные компаунды для защиты печатных плат. Параметры и методы испытаний», разработан на основе военного стандарта MIL-I-46058C. Покрытия на основе полиуретановых и эпоксиуретановых пленкообразующих наиболее полно соответствуют заявляемым требованиям, так как обладают широким спектром свойств и обеспечивают надежную защиту от воздействия агрессивных сред, но сложнее поддаются удалению при проведении ремонта изделия [19]. В последние годы стремление к созданию более экологичных и высокоэффективных покрытий по разумной цене привело к усовершенствованию многих процессов производства УФ-отверждаемых водорастворимых полиуретановых материалов [20]. Именно водоразбавляемые полиуретановые лакокрасочные материалы являются современным классом пленкообразующих материалов и могли бы стать перспективными для создания влагозащитных покрытий для печатных узлов и модулей радиоэлектронной аппаратуры. В РФ производством водных полиуретановых дисперсий занимается, например, компания ООО «ПолиМикс Казань».

Таблица

Характеристики влагозащитных электроизоляционных лаков

Свойства	Значения свойств для материала состава									
	однокомпонентного					двухкомпонентного				
	акрил-уретанового лака HumiSeal® UV500	уретанового лака HumiSeal® 1A33	акрилового лака Stamolin Plastik	уретанового лака Stamolin Urethane Clear	эпоксигуртанового лака UR-231	эпоксидного лака ЭП-730	силоксанфторуретанового лака ВЛ-21	кремнеорганического лака КО-918	кремнеорганического лака КО-945	
Время высыхания (до отлипа), ч (не более)	УФ-отверждение	15 мин	0,5	0,5	9	1	6	1,5	24	
Срок годности (жизнеспособность) лака при температуре 20±2 °С, ч	В течение срока годности материала, установленного разработчиком					48	Не менее 8	–	–	
Электрическая прочность, кВ/мм (не менее)	–	–	21,0	82,9	60	60	–	60	60	
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см (не менее)	8,0·10 ¹²	2,0·10 ¹⁴	1,0·10 ¹⁶	5,1·10 ¹⁴	1,0·10 ¹⁴	5,0·10 ¹²	5,0·10 ¹⁴	1,0·10 ¹⁴	1,0·10 ¹⁴	
Тангенс угла диэлектрических потерь (не более)	0,030	0,024	0,040	0,040	0,030	–	0,030	–	–	

Фторполимерные пленкообразующие – один из новых типов материалов для получения электроизоляционных влагозащитных покрытий. Фторполимеры применяются в широком интервале температур, имеют высокую химическую стойкость и низкую смачиваемость, являются прекрасными диэлектриками. Для электроники, эксплуатируемой в сложных условиях (при резких перепадах температур), на российском рынке представлен фторсодержащий акриловый защитный материал марки 1700 Electronic Grade Coating торговой марки NovecTM 3MTM. Он предназначен для получения прозрачной пленки толщиной не более 1 мкм. Полученное покрытие обеспечивает защиту электронного узла от влаги, химических воздействий и коррозии [21].

Проблемы развития фторполимерной химии и отечественного рынка фторполимеров хорошо освещены в работе [22].

Специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведены исследования кинетики отверждения и паропроницаемости, процесса уретанообразования модифицированных фторсодержащих олигомеров и конформных покрытий на их основе, физико-механических и адгезионных свойств. В результате этих исследований разработан фторсодержащий влагозащитный электроизоляционный лак ВЛ-21, предназначенный для защиты печатных плат и элементов радиоэлектронного оборудования, эксплуатируемых в интервале температур от –60 до +120 °С, от воздействия факторов внешней среды [23–26]. Лак ВЛ-21 является двухкомпонентным и обеспечивает формирование качественного лакокрасочного покрытия – однородного, без шагрени, подтеков и шероховатостей. Полимеризация лака протекает при температуре 20±2 °С не более 5 ч. Технологические характеристики лака ВЛ-21 позволяют провести его опробование в автоматизированных системах нанесения влагозащиты.

В случае необходимости нанесения покрытий, работающих при относительно высоких температурах, могут быть использованы электроизоляционные кремнийорганические двухкомпонентные лаки КО-918 и КО-945, свойства которых приведены в таблице.

В качестве перспективных направлений исследований в области разработки лаковых покрытий можно рассматривать покрытия на основе полиимидов. Получение и исследование органических растворимых полиимидов с низкой диэлектрической проницаемостью, содержащих трифторметил, вызывают большой интерес у ученых. Полиимиды обладают отличными характеристиками, высокой пропускающей способностью, отличной растворимостью, низким водопоглощением, высокой теплостойкостью и низкой диэлектрической проницаемостью [27].

В зарубежной научно-технической литературе большой интерес вызывают исследования в области получения материалов с максимально низкой диэлектрической проницаемостью – важнейшим показателем качества для электроизоляционных лаковых покрытий печатных узлов. К новому поколению материалов с низким коэффициентом диэлектрической проницаемости относят фторированный поли(гидроксиамид) [28] и нанокompозитные пленки, полученные путем введения фторированного графена во фторированный полибензоксазол [29]. Исследуются также свойства нанокompозитов, полученных на основе бисмалеимид-триазиновой смолы, – в частности, эффект синергии между нанопорами и C–F-связями [30].

Заключения

Для обеспечения неразрывности единства «материал – технология – конструкция и оборудование» необходимо обеспечить промышленность высокотехнологичными отечественными материалами [31], а наиболее эффективный обмен информацией между научно-исследовательскими институтами и производственными предприятиями может быть реализован путем создания единой электронной комплексной системы

мониторинга и анализа свойств авиационных материалов, а также соответствующего информационно-аналитического Центра РФ [32–34].

Автоматизация процесса нанесения влагозащитных покрытий позволяет повысить производственную эффективность, точность и стабильность. В свою очередь, строгое соблюдение технологической дисциплины на всех этапах позволит получить экономически выгодный процесс нанесения влагозащитного покрытия и обеспечит идеальное производство покрытий. Указанный способ позволяет минимизировать ручной труд, исключить операцию по изоляции тех участков на плате, которые не должны подвергаться окрашиванию, и тем самым практически исключить влияние человеческого фактора на качество изготавливаемой продукции.

Следует отметить, что, несмотря на все преимущества импортных лаков, их применение при производстве изделий военной техники недопустимо и в настоящее время проблема отсутствия аналогов стоит крайне остро. Таким образом, при исследованиях и разработке новых электроизоляционных влагозащитных лаков необходимо учитывать возможность нанесения материалов различными методами, а также их отверждения под воздействием УФ-излучения для ускорения процесса сушки и повышения надежности защиты печатных узлов от разрушающего воздействия влаги.

Список источников

1. О Стратегии развития электронной промышленности РФ на период до 2030 г. и плане мероприятий по ее реализации: Распоряжение Правительства РФ от 17 января 2020 г. № 20-р // Гарант: информационно-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73340483> (дата обращения: 13.12.2021).
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Кушнарев К. Современная технология нанесения влагозащитных покрытий // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 6 (12). С. 54–57.
4. Уразев В. Селективная влагозащита // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 2 (22). С. 62–67.
5. Топунова М. Лакировка в действительности. Селективное нанесение защитных материалов. Автоматизация нанесения лака УР-231 // Технологии в электронной промышленности. 2015. № 3 (79). С. 10–11.
6. Кузнецова В.А., Железняк В.Г., Баранова Н.В., Лебедева Н.Н. Влияние отвердителя ОС-17 на эксплуатационные свойства покрытия на основе лака УР-231 // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-68-76.
7. Guy N., Giani O., Blanquer S. et al. Photoinduced ring-opening polymerizations // Progress in organic coatings. 2021. Vol. 153. Art. 106159.
8. Resin-reinforced UV, moisture and UV/moisture dual curable silicone compositions: pat. US 6828355; filed 07.07.00; publ. 07.12.04.
9. Dual-curing coating formulation and method: pat. US 5712321; filed 01.02.96; publ. 27.01.98.
10. Siloxanes and silanes cured by organoborane amine complexes: pat. US 7732543; filed 13.12.05; publ. 08.06.10.
11. Photocurable moisture-proof insulating coating material and method for manufacturing moisture proof insulated electronic part using the same: pat. JP 2011088975; filed 21.10.09; publ. 06.05.11.
12. High-temperature-resistant high-frequency conformal coating: pat. CN 101654585; filed 21.09.09; publ. 24.02.10.
13. Conformal coating shielding method of circuit board: pat. CN 102123564; filed 26.11.10; publ. 13.07.11.
14. Кипинг Дж. Оценка эффективности и стоимости новых видов влагозащитных покрытий // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 6. С. 66–71.

15. Чеботаревский В.В., Еникеева Г.А., Амеличева В.В., Першина Н.А. Отверждение лака УР-231 методом ультрафиолетового облучения // Технология авиационного агрегат- и приборостроения. 1982. № 2. С. 14–17.
16. Автоматизированное селективное нанесение УР-231 – теперь это реальность! // Assemrus.ru: Решения для производства электроники. 2021. URL: <https://www.assemrus.ru/pressroom/news/avtomatizirovannoe-selektivnoe-naneshenie-ur-231-teper-eto-realnost/> (дата обращения: 13.12.2021).
17. Селективное нанесение защитных материалов. Автоматизация нанесения лака УР-231 // Dipaul.ru: Компания «Диполь». 2021. URL: <https://dipaul.ru/news/lakirovka-v-deystvitelnosti/> (дата обращения: 13.12.2021).
18. Левкина Н., Ванцов С., Медведев А. Влагозащитные покрытия печатных плат // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2018. № 7 (178). С. 124–129.
19. Киннер Ф., Шихов С. Конформные покрытия для жестких условий эксплуатации // Технологии в электронной промышленности. 2020. № 4 (120). С. 26–32.
20. Dall Agnol L., Dias F.T.G., Ornaghi H.L. et al. UV-curable waterborne polyurethane coatings: A state-of-the-art and recent advances review // Progress in organic coatings. 2021. Vol. 154. Art. 106156.
21. Пескова С. Новая эра защитных покрытий для печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2017. № 8. С. 74–78.
22. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития // Российский химический журнал. 2008. Т. LII. № 3. С. 7–12.
23. Нефедов Н.И., Алексакин В.М., Семенова Л.В., Дерьков Д.С. Исследование кинетики отверждения и паропроницаемости модифицированных фторсодержащих олигомеров и конформных покрытий на их основе // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 2 (26). Ст. 4. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 10.12.2021).
24. Нефедов Н.И., Салихов Т.Р., Мельников Д.А. Исследование процессов отверждения электроизоляционных лаков // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-9-9.
25. Лаковая композиция: пат. 2613915 Рос. Федерация; заявл. 24.09.15; опубл. 22.03.17.
26. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
27. Lin D., Li R., Liu Y. et al. Clarifying the effect of moisture absorption and high-temperature thermal aging on structure and properties of polyimide film at molecular dynamic level // Polymer. 2020. Vol. 157. Art. 123251.
28. Hu K., Ye Q., Fan Y. et al. Preparation and characterization of organic soluble polyimides with low dielectric constant containing trifluoromethyl for optoelectronic application // European Polymer Journal. 2021. Vol. 157. Art. 110566.
29. Yu Z., Wu S., Li C. et al. Ultra-low dielectric constant fluorinated graphene/polybenzoxazole composite films with excellent thermal stabilities and mechanical properties // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2021. Vol. 145. Art. 106387.
30. Li X., Liu X., Hu X. et al. A novel low-dielectric nanocomposite with hydrophobicity property: Fluorinated MOFs modified bismaleimide-triazine resin // Materials Today Communications. 2021. Vol. 29. Art. 102802.
31. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
32. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
33. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
34. 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. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.260.6.001.

References

1. *On the Strategy for the Development of the Electronic Industry of the Russian Federation for the period up to 2030 and the action plan for its implementation*: Decree of the Government of the Russian Federation dated January 17, 2020 No. 20-r. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73340483> (accessed: December 13, 2021).
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Kushnarev K. Modern technology for applying moisture-proof coatings. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2006, no. 6 (12), pp. 54–57.
4. Urazaev V. Selective moisture protection. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2008, no. 2 (22), pp. 62–67.
5. Topunova M. Varnishing in reality. Selective application of protective materials. Automation of varnish application UR-231. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2015, no. 3 (79), pp. 10–11.
6. Kuznetsova V.A., Zheleznyak V.G., Baranova N.V., Lebedeva N.N. Influence of hardener OC-17 on exploiting properties of the varnish covering YP-231. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-68-76.
7. Guy N., Giani O., Blanquer S. et al. Photoinduced ring-opening polymerizations. *Progress in organic coatings*, 2021, vol. 153, art. 106159.
8. *Resin-reinforced UV, moisture and UV/moisture dual curable silicone compositions*: pat. US 6828355; filed 07.07.00; publ. 07.12.04.
9. *Dual-curing coating formulation and method*: pat. US 5712321; filed 01.02.96; publ. 27.01.98.
10. Siloxanes and silanes cured by organoborane amine complexes: pat. US 7732543; filed 13.12.05; publ. 08.06.10.
11. *Photocurable moisture-proof insulating coating material and method for manufacturing moisture proof insulated electronic part using the same*: pat. JP 2011088975; filed 21.10.09; publ. 06.05.11.
12. *High-temperature-resistant high-frequency conformal coating*: pat. CN 101654585; filed 21.09.09; publ. 24.02.10.
13. *Conformal coating shielding method of circuit board*: pat. CN 102123564; filed 26.11.10; publ. 13.07.11.
14. Keeping J. Evaluation of the effectiveness and cost of new types of waterproof coatings. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2008, no. 6, pp. 66–71.
15. Chebotarevsky V.V., Enikeeva G.A., Amelicheva V.V., Pershina N.A. Curing varnish UR-231 by ultraviolet irradiation. *Tekhnologiya aviatsionnogo agregato- i priborostroyeniya*, 1982, no. 2, pp. 14–17.
16. *Automated selective application UR-231 – now it's a reality!* Available at: <https://www.assemrus.ru/pressroom/news/avtomatizirovannoe-selektivnoe-nanesenie-ur-231-teper-eto-realnost/> (accessed: December 13, 2021).
17. *Selective application of protective materials. Automation of varnish application UR-231*. Available at: <https://dipaul.ru/news/lakirovka-v-deystvitelnosti/> (accessed: December 13, 2021).
18. Levkina N., Vantsov S., Medvedev A. Moisture-proof coatings for printed circuit boards. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*, 2018, no. 7 (178), pp. 124–129.
19. Kinner F., Shikhov S. Conformal coatings for harsh operating conditions. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2020, no. 4 (120), pp. 26–32.
20. Dall Agnol L., Dias F.T.G., Ornaghi H.L. et al. UV-curable waterborne polyurethane coatings: A state-of-the-art and recent advances review. *Progress in organic coatings*, 2021, vol. 154, art. 106156.
21. Peskova S. New era of protective coatings for printed circuit boards. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti*, 2017, no. 8, pp. 74–78.
22. Buznik V.M. The state of domestic chemistry of fluoropolymers and possible development prospects. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 7–12.
23. Nefedov N.I., Aleksashin V.M., Semenova L.V., Derkov D.S. Investigation of the kinetics of curing and vapor permeability of modified fluorine-containing oligomers and conformal coatings based on them. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 2 (26), paper no. 4. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: December 13, 2021).

24. Nefedov N.I., Salikhov T.R., Melnikov D.A. Study of the curing processes of electroinsulating varnishes. *Trudy VIAM*, 2016, no. 6, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-9-9.
25. *Lacquer composition*: pat. 2613915 Rus. Federation; filed 24.09.15; publ. 22.03.17.
26. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. (accessed: December 13, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
27. Lin D., Li R., Liu Y. et al. Clarifying the effect of moisture absorption and high-temperature thermal aging on structure and properties of polyimide film at molecular dynamic level. *Polymer*, 2020, vol. 157, art. 123251.
28. Hu K., Ye Q., Fan Y. et al. Preparation and characterization of organic soluble polyimides with low dielectric constant containing trifluoromethyl for optoelectronic application. *European Polymer Journal*, 2021, vol. 157, art. 110566.
29. Yu Z., Wu S., Li C. et al. Ultra-low dielectric constant fluorinated graphene/polybenzoxazole composite films with excellent thermal stabilities and mechanical properties. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, vol. 145, art. 106387.
30. Li X., Liu X., Hu X. et al. A novel low-dielectric nanocomposite with hydrophobicity property: Fluorinated MOFs modified bismaleimide-triazine resin. *Materials Today Communications*, 2021, vol. 29, art. 102802.
31. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. Modern polymer materials for manufacture of elements of the air conditioning system in flying apparatus. *Trudy VIAM*, 2017, no. 12 (60), paper no. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
32. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
33. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a unified information and analytical center for aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
34. 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. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.260.6.001.

Информация об авторах

Козлова Алеся Александровна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Кузнецова Вера Аркадьевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Vera A. Kuznetsova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.01.2022.
The article was submitted 28.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 11.01.2022.

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-84-95

СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОСЛЕ НАТУРНОГО СТАРЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ В УСЛОВИЯХ ВЛАЖНЫХ СУБТРОПИКОВ

В.П. Руднев¹, И.В. Мекалина²

¹Филиал Института природно-технических систем, Сочи, Россия; stc-sochi@mail.ru

²Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Особый интерес для материаловедения представляет климатическое старение полимерных материалов в напряженном состоянии. Такой вид испытаний более реально отражает эксплуатационные условия работы материалов в изделиях. Представлены механические свойства материалов авиационного остекления после экспонирования в натурных условиях влажных субтропиков при одновременном воздействии изгибающих нагрузок эксплуатационного уровня.

Ключевые слова: органические стекла, статические нагрузки, климатическое старение, механические свойства

Для цитирования: Руднев В.П., Мекалина И.В. Свойства органических стекол после натурального старения под нагрузкой в условиях влажных субтропиков // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 08. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-84-95.

Scientific article

PROPERTIES OF ORGANIC GLASSES AFTER NATURAL AGING UNDER LOAD IN HUMID SUBTROPICS

V.P. Rudnev¹, I.V. Mekalina²

¹Branch of the Institute of natural and technical systems, Sochi, Russia; stc-sochi@mail.ru

²Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Climatic aging of polymeric materials in a stressed state is of particular interest for materials science. This type of testing more realistically reflects the operating conditions of materials in products. Mechanical properties of aviation glazing materials are presented after exposure in natural conditions of humid subtropics with simultaneous exposure to bending loads of the operational level.

Keywords: organic glasses, static loads, climatic aging, mechanical properties

For citation: Rudnev V.P., Mekalina I.V. Properties of organic glasses after natural aging under load in humid subtropics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 08. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-84-95.

Введение

Требования к прозрачности материалов защитного остекления кабины летчиков появились с самого начала создания самолетов. В первое время из оргстекла изготавливали детали остекления негерметичных кабин самолетов для защиты пилотов от воздушных потоков и влаги. С развитием самолетостроения возникла необходимость

создания прозрачных материалов для герметичных кабин, способных работать наряду с металлическими материалами на внешнем контуре самолета в качестве силовых конструкционных материалов. Детали остекления должны удовлетворять требованиям высокой конструкционной прочности и надежности в широком диапазоне эксплуатационных температур, а также основному функциональному требованию – высокому светопропусканию без оптического искажения. Разрушение остекления герметичных кабин самолетов приводит к катастрофическим последствиям.

Все большее внимание уделяется испытанию на атмосферостойкость различных классов полимерных материалов с одновременным наложением эксплуатационных нагрузок [1–11]. Такой вид испытаний позволяет более достоверно оценить работу материалов в натурных условиях и скорректировать прогноз работы материала в изделиях.

Опыт проведения длительных испытаний органических стекол в различных климатических зонах и результаты длительной эксплуатации остекления показали, что для изделий авиационной техники атмосферостойкость органических стекол является одной из важнейших характеристик для прогнозирования ресурса их эксплуатации [12].

В то же время для обоснования сроков службы материалов авиационного остекления необходимо учитывать возможности ухудшения комплекса показателей свойств как при климатическом старении в условиях стоянки самолета, так и за счет эксплуатационного воздействия в условиях полета.

В связи с этим проведены исследования, моделирующие влияние одного из основных воздействующих эксплуатационных факторов – изгибной нагрузки в сочетании с климатическим старением органических стекол. Это позволило оценить влияние длительно действующих статических нагрузок эксплуатационного уровня на механические показатели органических стекол различного химического строения и модификаций при старении в натурных условиях.

Материалы и методы

Для исследования выбраны полиметилметакрилатные (ПММА) и фторакрилатные органические стекла в ориентированном и неориентированном состояниях [13–15]. Кроме того, спектр исследуемых материалов расширен за счет термообработанных стекол и стекол с термостабилизирующими добавками. Перечень исследуемых материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень исследуемых органических стекол

Полиметилметакрилатные стекла		Фторакрилатные (теплостойкие) стекла	
неориентированные	ориентированные	неориентированные	ориентированные
СО-120	АО-120, $\varepsilon = 50 \%$	Э-2	Э-2У
СО-120 (т/о)	АО-120, $\varepsilon = 50 \%$ (т/о)	Э-2 (т/о)	Э-2, $\varepsilon = 43 \%$ (т/о)
СО-120Т	АО-120, $\varepsilon = 85 \%$	СО-200Т	СО-200, $\varepsilon = 43 \%$
СО-120Т (т/о)	АО-120, $\varepsilon = 85 \%$ (т/о)	–	–
Примечание. ε – степень вытяжки ориентированных материалов; т/о – термообработанные материалы; Т – материалы с термостабилизирующими добавками.			

Органическое стекло Э-2У представляет собой ориентированное стекло Э-2 с последующей шлифовкой и полировкой поверхности с целью устранения дефектов не-термостойкости, возникающих при прогреве органического стекла перед ориентацией [16]. Образцы органических стекол СО-120, СО-120Т, АО-120 и ориентированного Э-2 термообработывали при температуре ниже температуры размягчения на 30–40 °С,

образцы неориентированного оргстекла Э-2 термообрабатывали при температуре размягчения. Образцы оргстекло представляли собой пластины размером 500×200 мм.

Для оценки комплексного воздействия факторов внешней среды и нагрузок эксплуатационного уровня исследуемые марки оргстекло испытывали на нагружающих устройствах для чистого изгиба [17]. Экспозицию образцов на нагружающих устройствах, в которых реализована схема четырехточечного изгиба, осуществляли на открытой атмосферной площадке и под навесом [18] в условиях влажных субтропиков Черноморского побережья. Известно [19–22], что район влажных субтропиков (зона тепло-влажного климата по ГОСТ 16350–80) является одним из наиболее агрессивных районов по отношению к конструкционным материалам различного класса. При этом неоднократно отмечалось [12, 19, 23], что солнечная радиация и, в первую очередь, ее ультрафиолетовая составляющая являются наиболее агрессивными факторами, вызывающими деструктивные процессы, приводящие к снижению прочностных и эксплуатационных свойств органического стекла.

Таким образом, экспозиция органических стекол под напряжением в данной зоне, характеризующейся высокой интенсивностью солнечного излучения, повышенной среднегодовой температурой и влажностью воздуха, относится к достаточно жестким условиям испытаний, результаты которых дают возможность более корректно спрогнозировать или подтвердить ресурс эксплуатации деталей самолетного остекления как в умеренном климате, так и во влажных субтропических и тропических климатических районах. Кроме того, технические сложности и невозможность проводить такого вида испытания в искусственных условиях повышают их практическую значимость.

Общий вид участка для испытаний в напряженном состоянии на атмосферной площадке показан на рис. 1, а.

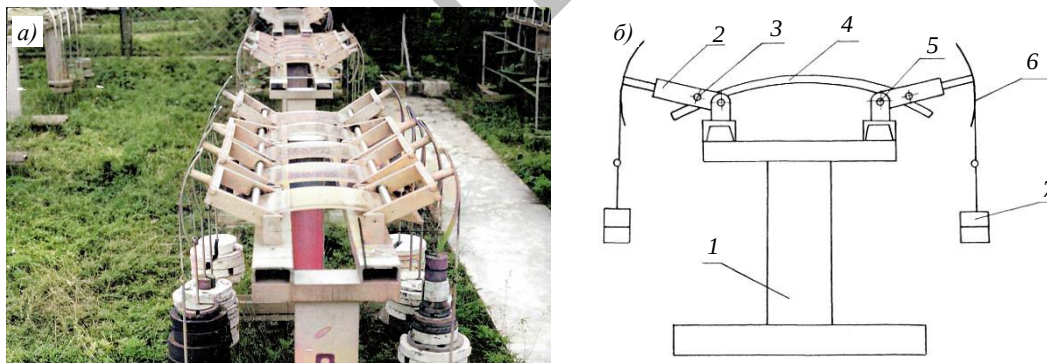


Рис. 1. Общий вид участка для испытаний в напряженном состоянии на атмосферной площадке (а) и конструктивная схема нагружающего устройства для чистого изгиба (б)

Нагружающее устройство имеет пять независимых ячеек (рис. 1, б), закрепленных на основании 1. В образце 4, расположенном между осями 3 и 5, под действием груза 7 и рычага 2 создаются напряжения чистого изгиба. Наличие цилиндрического сегмента 6 позволяет сохранять постоянный уровень нагружения при изменении положения нагружающих рычагов.

Величина напряжений изгиба ($\sigma_{в.и}$) составляла:

- для полиметилметакрилатных неориентированных стекол... 10 МПа;
- для полиметилметакрилатных ориентированных стекол... 15 и 20 МПа;
- для фторакрилатных неориентированных и ориентированных стекол... 20 и 25 МПа.

Общая продолжительность экспонирования плит органического стекла составляла 3 года.

Методику оценки атмосферной устойчивости материалов остекления при длительных испытаниях под нагрузкой на нагружающих устройствах данного типа осуществляли на основе РТМ 1.2.076–85 [24]. Она включала: метод расчета напряжения в образце, учет трения между образцами и нагружающими осями, определение деформационных свойств материалов при длительном старении под изгибной нагрузкой.

Для задания требуемых изгибных напряжений в образце – согласно кинематической схеме, изображенной на рис. 2, а, – определяли массу грузов. При этом использовали расчетные формулы, приведенные в работе [25].

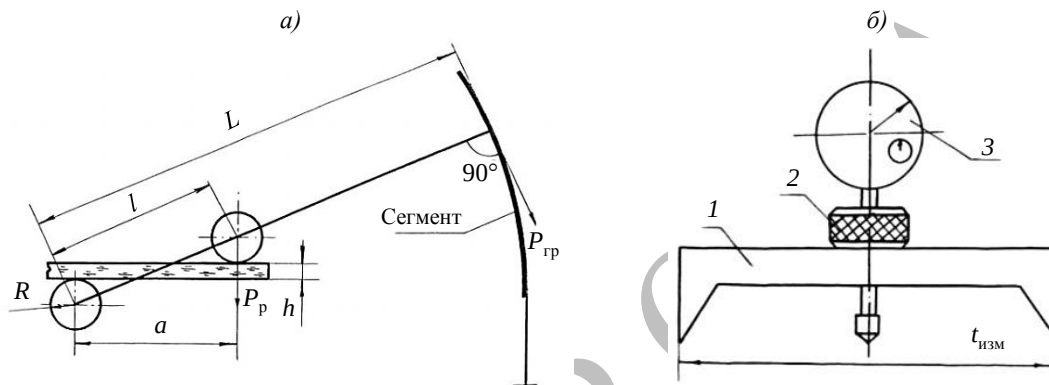


Рис. 2. Кинематическая схема нагружения образца (а) и схематичное изображение измерителя прогиба (б)

Контроль заданной изгибной нагрузки на начальном этапе старения осуществляли с помощью измерителя прогиба, показанного на рис. 2, б, состоящего из скобы 1, установочного винта 2 и индикатора часового типа 3. В дальнейшем с помощью данного приспособления оценивали изгибную деформацию (f), которая развивалась в экспонируемых образцах в процессе старения.

Для оценки механических свойств органических стекол использовали следующие показатели:

- предел прочности при растяжении (по ГОСТ 11262–2017);
- удельную ударную вязкость (по ГОСТ 4647–2015).

Ранее отмечалось [12, 26], что ударная вязкость является одной из наиболее чувствительных характеристик органических стекол при воздействии агрессивных климатических и эксплуатационных факторов из-за того, что внешняя среда в большей степени воздействует на тонкий поверхностный слой материала. Это делает ударопрочность важным параметром оценки климатической стойкости данных материалов.

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

Результаты и обсуждение

Деформативность. Как показали исследования, при данном виде испытаний в процессе старения в экспонируемых пластинах развивается изгибная деформация. В качестве примера для некоторых марок органических стекол на рис. 3 показана кинетика увеличения прогиба образцов при старении под навесом, а в табл. 2 представлены значения исходных (f_0) и текущих прогибов пластин ($f_{тек}$) на базе 120 мм после 8 мес экспонирования.

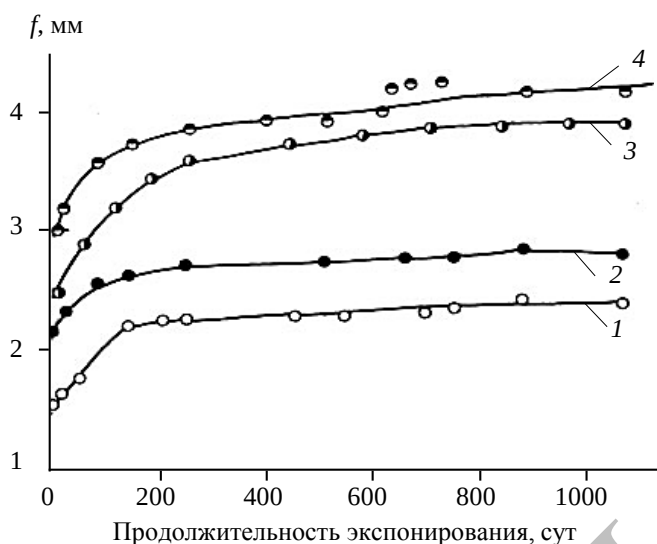


Рис. 3. Временная зависимость прогиба образцов f на базе 120 мм при старении под навесом для стекол: 1 – СО-120 толщиной $h = 7,9$ мм при $\sigma_{в.и} = 10$ МПа; 2 – Э-2У (ориентированное) $h = 11,5$ мм при $\sigma_{в.и} = 20$ МПа; 3 – АО-120 со степенью вытяжки 85 % и $h = 7$ мм при $\sigma_{в.и} = 15$ МПа; 4 – СО-200 (ориентированное) $h = 8,5$ мм при $\sigma_{в.и} = 20$ МПа

Таблица 2

Значения прогибов образцов на базе 120 мм после 8 мес экспонирования под нагрузкой

Стекло	Условия экспозиции	Толщина образца, мм	$\sigma_{в.и}$, МПа	Исходный прогиб f_0 , мм	Текущий прогиб $f_{тек}$, мм
СО-120 т/о	Открытая площадка	7,8	10,0	1,90	2,43
	Под навесом	7,8	10,0	1,66	2,30
АО-120 со степенью вытяжки 50 % (т/о)	Открытая площадка	8,0	15,0	2,30	3,10
	То же	8,4	20,0	2,50	3,70
Э-2	Открытая площадка	8,4	20,0	2,78	3,33
	Под навесом	8,2	20,0	2,50	3,61

Как видно из данных рис. 3, кинетика увеличения прогиба образцов при сроках экспозиции >200 сут носит режим установившейся ползучести. Ход кривых ползучести при экспозиции образцов на открытой атмосферной площадке имеет аналогичный характер. Очевидно, что при прогнозировании деформативности стекла на длительные сроки (≥ 3 лет) следует учитывать режим установившейся ползучести.

Роль ориентации, термообработки, введения термостабилизатора и условий экспозиции. При климатическом старении с одновременным воздействием механической нагрузки наиболее эффективно показала себя ориентация в органических стеклах на основе ПММА. Это наглядно иллюстрируется старением неориентированного стекла СО-120 и ориентированного стекла АО-120 со степенью вытяжки 85 %, представленных на рис. 4. Снижение значений предела прочности при растяжении ($\sigma_{в}$) после 3 лет старения под нагрузкой для стекла СО-120 составляет 40 %, а для ориентированного стекла АО-120 со степенью вытяжки 85 % – лишь 10 %. В рассматриваемом примере для показателя ударной вязкости a_n наблюдается снижение значений на 70 % для стекла СО-120, в то время как у ориентированного стекла АО-120 – всего на 8 %.

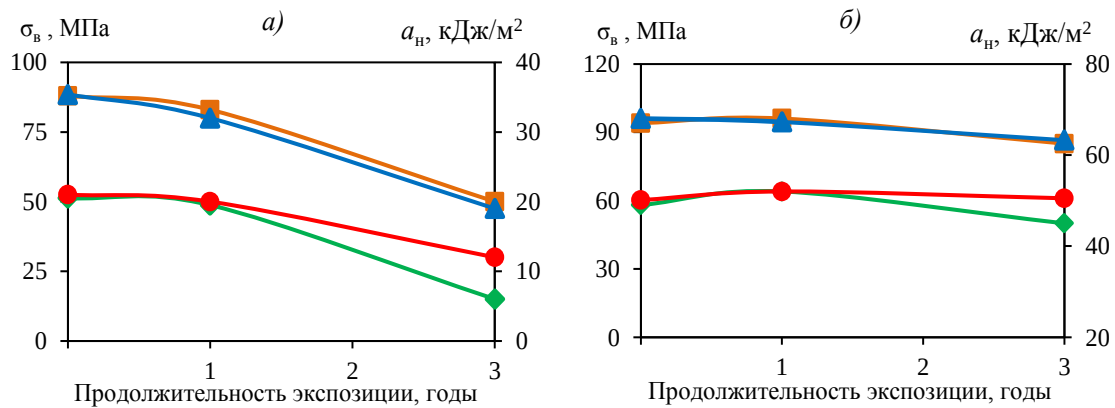


Рис. 4. Зависимость предела прочности при растяжении (σ_b) ($\blacktriangle$, $\blacksquare$) и ударной вязкости (a_n) ($\blacklozenge$, $\bullet$) от продолжительности старения на открытой атмосферной площадке под нагрузкой для органического стекла СО-120 при $\sigma_{в.и} = 10$ МПа (а) и стекла АО-120 со степенью вытяжки 85 % при $\sigma_{в.и} = 15$ МПа (б); $\blacktriangle$, $\bullet$ – термообработанные стекла

В то же время ориентация фторакрилатных стекол для такого чувствительного показателя, как ударная вязкость, оказывает заметное положительное влияние лишь на начальных этапах старения в условиях теплого влажного климата, далее при сроках старения ≥ 2 лет различия у ориентированных и неориентированных стекол не столь существенны (рис. 5 и 6).

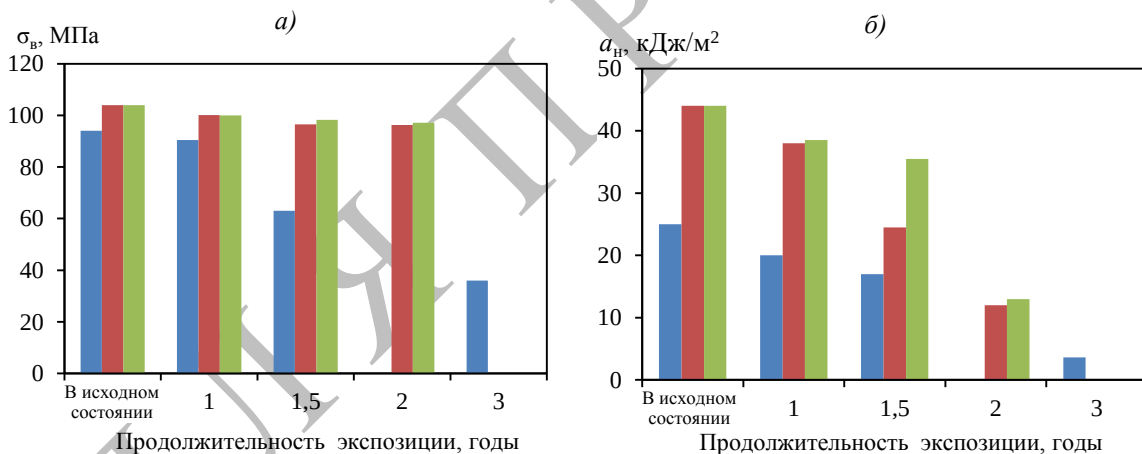


Рис. 5. Зависимость предела прочности при растяжении (а) и ударной вязкости (б) от продолжительности старения на открытой атмосферной площадке под нагрузкой 20 ($\blacksquare$, $\bullet$) и 25 МПа ($\blacksquare$) для органического стекла Э-2 ($\blacksquare$) и ориентированного стекла Э-2У ($\blacksquare$, $\bullet$)

Характерным примером влияния термообработки на старение ПММА органических стекол под нагрузкой являются данные, представленные на рис. 4. Вне зависимости от уровня нагружения термообработка не дает значимого эффекта на начальном этапе, однако сохраняет на более высоком уровне прочностные свойства по сравнению с нетермообработанными стеклами при продолжительности экспозиции ≥ 3 лет. Для фторакрилатных стекол термообработка имеет не столь существенное значение, что, по-видимому, связано с более быстрым протеканием процессов деструкции в поверхностных слоях (по сравнению с ПММА стеклами), обусловленных наличием в составе теплостойких стекол ароматических циклов [23].

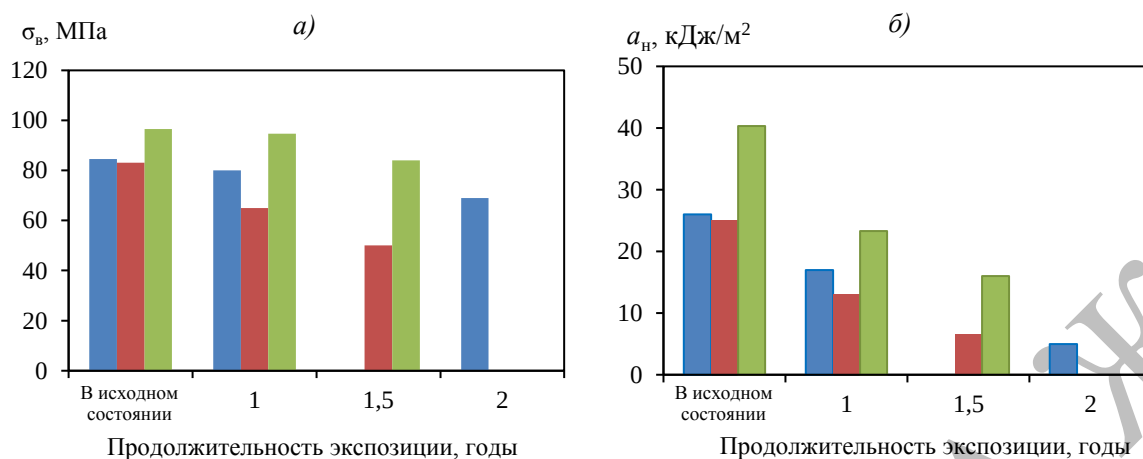


Рис. 6. Зависимость предела прочности при растяжении (а) и ударной вязкости (б) от продолжительности старения на открытой атмосферной площадке при свободной экспозиции (■) [26] и под нагрузкой 20 МПа (■, ■) для оргстекла СО-200Т (■, ■) и СО-200 (ориентированное) (■)

Влияние нагрузки на органические стекла с термостабилизатором при климатическом старении рассмотрено на примере органического стекла СО-120 (рис. 7). Видно, что значения механических показателей после 3 лет старения в термостабилизированном стекле СО-120Т остаются на более высоком уровне.

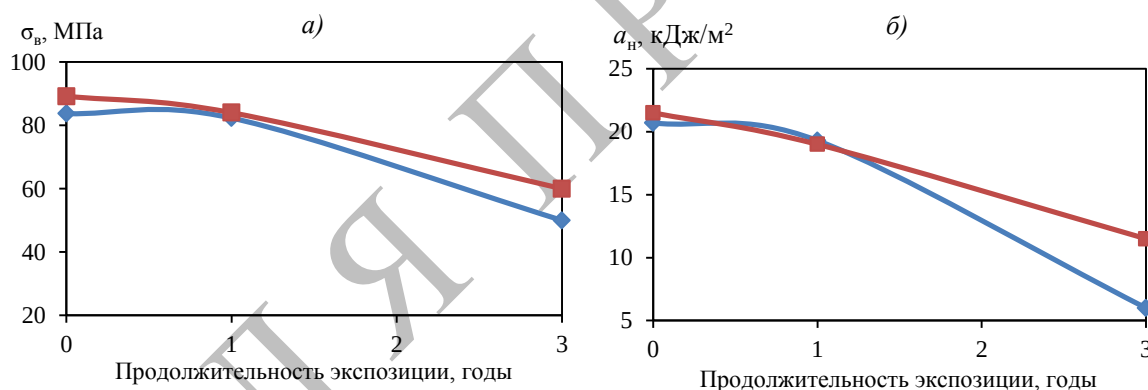


Рис. 7. Зависимость предела прочности при растяжении (а) и ударной вязкости (б) от продолжительности старения на открытой атмосферной площадке под нагрузкой 10 МПа для органических стекол СО-120 (◆) и СО-120Т (■)

Отсутствие такого агрессивного воздействующего фактора, как прямое солнечное излучение, нашло свое отражение при экспозиции образцов органических стекол под навесом. Такое значительное снижение ударной вязкости, которое наблюдается при экспозиции на открытой атмосферной площадке, отсутствует при испытаниях под навесом (рис. 8). При этом снова подтверждается эффективность ориентации ПММА стекол.

Влияние химического строения. Анализ представленных результатов показывает, что органические стекла всех модификаций на основе ПММА обладают более высокой устойчивостью (рис. 4 и 7) к совместному воздействию климата и механической нагрузки по сравнению с теплостойкими стеклами (рис. 5 и 6). Влияние механической нагрузки заметно сказывается уже на начальных стадиях старения теплостойких стекол

марок Э-2 и СО-200, а при экспозиции в течение 2 лет в условиях теплого влажного климата различия в ударопрочностных показателях теплостойких стекол в свободном [27] и нагруженном состоянии незначительны. Для стекла Э-2 при свободной экспозиции в течение 3 лет на открытой атмосферной площадке снижение значения ударной вязкости a_H составляет 86 %, а под нагрузкой 87 %. Это объясняется, по-видимому, достижением некоторого критического состояния поверхности, при превышении которого характер разрушения оргстекла становится хрупким [28].

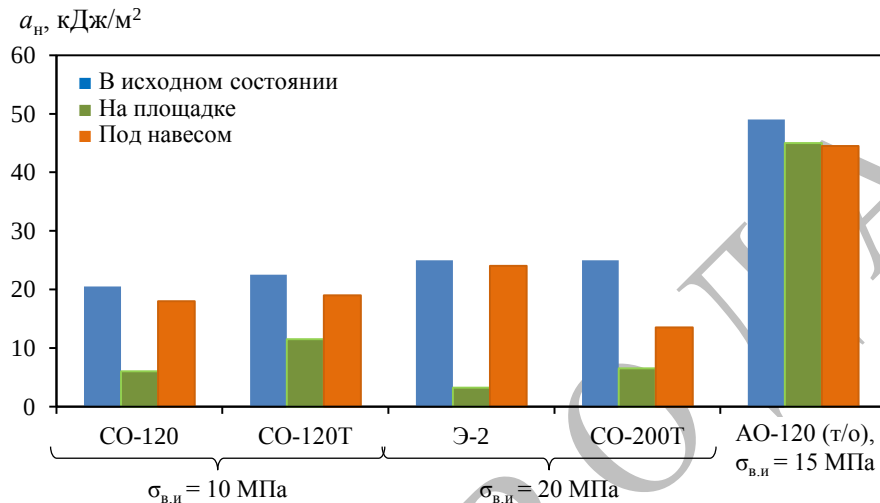


Рис. 8. Значения ударной вязкости при старении на открытой атмосферной площадке и под навесом после 3 лет экспозиции для оргстекла СО-120, СО-120Т, Э-2 и АО-120 (со степенью вытяжки 85 %), а также для оргстекла СО-200Т после 2 лет экспозиции

Синергизм. На основании сопоставления изменений механических показателей оргстекла, состаренных в свободном [28] и нагруженном состояниях, обнаружен отчетливо выраженный синергический эффект. Совместное воздействие климатических факторов и механической нагрузки существенно ускоряет протекание процессов старения в сравнении со свободной экспозицией. Например, для стекла СО-120 после 3 лет старения в свободном состоянии в условиях открытой атмосферы [27] снижение ударной вязкости составляет 12 %. В то же время при старении в нагруженном состоянии (рис. 4) на открытой атмосферной площадке этот показатель снижается на 71 %. Эта закономерность отмечается и для других марок органических стекол.

Заключения

Рассмотрено влияние на авиационные органические стекла комплексного воздействия климатических условий влажных субтропиков с одновременным воздействием нагрузок эксплуатационного уровня. Органические стекла экспонировались в статическом напряженном состоянии на нагружающих устройствах, в которых реализована деформация частичного изгиба. Сроки старения органических стекол под нагрузкой составляли от 1 года до 3 лет. Исследованы ПММА оргстекла СО-120 и АО-120, термостабилизированное оргстекло СО-120Т и фторакрилатные теплостойкие стекла Э-2 и СО-200 в неориентированном и ориентированном состояниях.

По результатам работы следует отметить, что механическая нагрузка действует на исследуемые марки органических стекол как фактор, заметно усиливающий влияние климатического старения. Воздействие теплого влажного климата с одновременным

наложением статической изгибающей нагрузки характеризуется ярко выраженным синергизмом по сравнению с экспозицией в свободном состоянии.

При таком виде испытаний более эффективна ориентация для органических стекол на основе ПММА по сравнению с фторакрилатными теплостойкими стеклами. Термообработка и введение термостабилизатора оказывают положительное влияние на климатическую стойкость оргстекол в напряженном состоянии.

При испытаниях материалов самолетного остекления под навесом подтвержден наиболее значимый вклад солнечного излучения в протекание процессов климатического старения органических стекол в натуральных условиях.

Исследование совместного влияния нагрузок эксплуатационного уровня и климатического старения в натуральных условиях позволило оценить стабильность механических свойств во времени, что имеет практическое значение и является важным для обоснования пределов работоспособности и прогнозирования срока службы органических стекол в авиационных изделиях.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
3. 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-S-388-392.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
5. Николаев Е.В., Славин А.В., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы (к 120-летию Г.В. Акимова) // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
7. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведков А.К. Влияние климатических факторов и механического нагружения на свойства углепластика на эпоксидном связующем // Пластические массы. 2012. № 2. С. 3–7.
8. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натуральных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
9. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
10. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 2. Основные тенденции // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
11. Старцев О.В., Лебедев М.П., Блазнов А.Н. Старение полимерных композиционных материалов в нагруженном состоянии // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 11. С. 2–12.

12. Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Орлова И.В., Кричевский Д.Д. Атмосферостойкость авиационных органических стекол // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2020: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». М.: ВИАМ, 2020. С. 22–36.
13. Авиационные материалы: справочник / под ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2002. Т. 8: Термопластичные, декоративно-отделочные материалы и пенопласты. 140 с.
14. Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла // Труды ВИАМ. 2013. № 11. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2022).
15. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Айзатулина М.К., Исаенкова Ю.А. История создания материалов самолетного остекления и полимерных материалов со специальными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48) С. 81–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-81-86.
16. Волкова В.П., Зайцева З.И., Усов В.В. Удаление дефектов оптической нетермостойкости листового органического стекла шлифованием и полированием // Вопросы авиационной науки и техники. Сер.: Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 1987. С. 19–20.
17. Устройство для испытания листовых материалов на изгиб: а.с. 896493 СССР. № 2917134/25-28; заявл. 05.04.80; опубл. 07.01.82.
18. ГОСТ 9.906–83. ЕСЗКС. Станции климатические испытательные. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 2004. 17 с.
19. Старцев О.В. Старение полимерных авиационных материалов в теплом влажном климате: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М., 1990. 80 с.
20. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость образцов сплава 1201 в морских субтропиках // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 3. С. 1–5.
21. Андреева Н.П., Павлов М.Р., Валиев Е.О., Дасковский М.И., Usagawa Z., Gómez Y.M. Влияние метеорологических параметров различных зон тропического климата на стойкость материалов в условиях натурных климатических испытаний // Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2019: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы». М.: ВИАМ, 2019. С. 7–17.
22. Балабанов И.П., Никифоров С.П., Пашковский И.С. и др. Имеретинская низменность. Природно-геологические условия, проблема освоения. М.: Недра, 2011. 281 с.
23. Сентюрин Е.Г., Гудимов М.М., Руднев В.П. и др. Старение органического стекла // Авиационная промышленность. 1993. № 5–6. С. 50–52.
24. РТМ 1.2.076–86. Метод испытания пластмасс на старение в естественных климатических условиях в нагруженном состоянии при изгибе. М.: ВИАМ, 1986. 23 с.
25. Тимошенко С.П., Гере Д. Механика материалов / под ред. Э.И. Григолюка. М.: Мир, 1976. 669 с.
26. Аскользин С.В., Фролков Ф.И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления // Авиационная промышленность. 2014. № 1. С. 41–44.
27. Климатическая стойкость термопластичных материалов авиационного назначения: справочное руководство / под ред. О.В. Старцева, Е.Г. Сентюрина, Б.И. Паншина. М.: ВИАМ, 1990. 42 с.
28. Старцев О.В., Лебедев М.П., Славин А.В., Ноев И.И. Механика разрушения неоднородно стареющих полимерных материалов // Доклады академии наук. 2018. Т. 483. № 5. С. 522–527.

References

1. 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.
2. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
3. 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.

4. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
5. Nikolaev E.V., Slavin A.V., Startsev V.O., Laptev A.B. Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems (to the 120th anniversary of G.V. Akimov). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-117-130.
6. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
7. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkov A.K. Influence of climatic factors and mechanical loading on the properties of carbon fiber reinforced plastic with epoxy binder. *Plasticheskiye massy*, 2012, no. 2, pp. 3–7.
8. Gladkikh A.V., Kurs I.S., Kurs M.G. Analysis of the data of full-scale climatic tests combined with the application of operational factors of nonmetallic materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-74-82.
9. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
10. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climatic factors (review). Part 2. Main trends. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
11. Startsev O.V., Lebedev M.P., Blaznov A.N. Aging of polymer composite materials in a loaded state. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 11, pp. 2–12.
12. Mekalina I.V., Sentyurin E.G., Orlova I.V., Krichevsky D.D. Weather resistance of aviation organic glasses. *Materials of V All-Rus. sci.-tech. conf. "Climate-2020: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems"*. Moscow: VIAM, 2020, pp. 22–36.
13. *Aviation materials: reference book*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2002, vol. 8: Thermoplastic, decorative and finishing materials and foam plastics. 140 p.
14. Mekalina I.V., Bogatov V.A., Trigub T.S., Sentyurin E.G. Aviation organic glasses. *Trudy VIAM*, 2013, no. 11, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2022).
15. Sentyurin E.G., Mekalina I.V., Ajzatulina M.K., Isaenkova Yu.A. The history of aircraft materials of glass and polymer materials with special properties (To the 75th anniversary Laboratory of polymer materials with special properties). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 81–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-81-86.
16. Volkova V.P., Zaitseva Z.I., Usov V.V. Removal of defects in the optical non-thermal resistance of sheet organic glass by grinding and polishing. *Voprosy aviation nauki i tekhniki. Ser.: Aviation materials*. Moscow: VIAM, 1987, pp. 19–20.
17. *Device for testing sheet materials for bending*: certificate of authorship 896493 USSR, no. 2917134/25-28; filed 05.04.80; publ. 07.01.82.
18. State Standard 9.906–83. *Climatic testing stations. General requirements*. Moscow: Publishing house of standards, 2004, 17 p.
19. Startsev O.V. *Aging of polymeric aviation materials in a warm humid climate*: thesis abstract, Dr. Sc. (Tech.). Moscow, 1990. 80 p.
20. Semenychev V.V. Corrosion resistance of samples of alloy 1201 in marine subtropics. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2015, no. 3, pp. 1–5.
21. Andreeva N.P., Pavlov M.R., Valeev E.O., Daskovsky M.I., Usagawa Z., Gómez Y.M. Influence of meteorological parameters of various tropical climate zones on the durability of materials under natural climatic tests. *Materials of IV All-Rus. sci.-tech. conf. "Climate-2019: Modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems"*. Moscow: VIAM, 2019, pp. 7–17.

22. Balabanov I.P., Nikiforov S.P., Pashkovsky I.S. et al. *Imeretinskaya lowland. Natural-geological conditions, the problem of development*. Moscow: Nedra, 2011, 281 p.
23. Sentyurin E.G., Gudimov M.M., Rudnev V.P. Aging organic glass. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1993, no. 5–6, pp. 50–52.
24. RTM 1.2.076–86. *Method for testing plastics for aging in natural climatic conditions in a loaded state in bending*. Moscow: VIAM, 1986, 23 p.
25. Timoshenko S.P., Gere D. *Mechanics of materials*. Ed. E.I. Grigolyuk. Moscow: Mir, 1976. 669 p.
26. Asklyin S.V., Frolkov F.I. Recovery of heat-resistant aviation glazing. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 1, pp. 41–44.
27. *Climatic stability of thermoplastic materials for aviation: a reference guide*. Ed. O.V. Startsev, E.G. Sentyurin, B.I. Panshin. Moscow: VIAM, 1990. 42 p.
28. Startsev O.V., Lebedev M.P., Slavin A.V., Noev I.I. Fracture mechanics of inhomogeneously aging polymeric materials. *Doklady Akademii nauk*, 2018, vol. 483, no. 5, pp. 522–527.

Информация об авторах

Руднев Валентин Петрович, ведущий инженер-исследователь, к.т.н., филиал Института природно-технических систем, stc-sochi@mail.ru

Мекалина Ирина Васильевна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Valentin P. Rudnev, Leading research engineer, Candidate of Sciences (Tech.), Branch of the Institute of natural and technical systems, stc-sochi@mail.ru

Irina V. Mekalina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.05.2022.
The article was submitted 13.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 20.05.2022.

Научная статья

УДК 620.178.3:539.389:544.015.4

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СПЛАВА ВТ6 ПРИ УСТАЛОСТИ

В.И. Капустин¹, К.В. Захарченко^{2,1}, В.К. Черепанова^{1,3}, В.Р. Шаяпов⁴

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия; rector@nstu.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; igil@hydro.nsc.ru

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; admin@itam.nsc.ru

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия; niic@niic.nsc.ru

Аннотация. Работа посвящена экспериментальному исследованию диссипативных свойств сплава ВТ6 (Ti–6Al–4V) в условиях однородного напряженно-деформированного состояния, которое реализуется в рабочей части гладкого образца, подвергаемого периодическому нагружению с увеличивающейся амплитудой. Эффекты неупругого деформирования, возникающего в материале при циклическом нагружении, рассматриваются с позиции термодинамики. Методика исследования позволяет на ранних стадиях обнаружить необратимые изменения термодинамических характеристик образца и определить критические напряжения, при которых происходит резкое изменение производных потенциала Гиббса. Термодинамический подход позволил высказать гипотезу о связи критических напряжений с точками фазовых переходов материала под нагрузкой.

Ключевые слова: упругопластическое деформирование, деформационные характеристики, термоупругий и диссипативный разогрев, структура, фазовый состав

Для цитирования: Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава ВТ6 при усталости // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.

Scientific article

INVESTIGATION OF DISSIPATIVE PROCESSES OF VT6 ALLOY UNDER FATIGUE

V.I. Kapustin¹, K.V. Zakharchenko^{2,1}, V.K. Cherepanova^{1,3}, V.R. Shayapov⁴

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia; rector@nstu.ru

²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; igil@hydro.nsc.ru

³Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; admin@itam.nsc.ru

⁴Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; niic@niic.nsc.ru

Abstract. The article is devoted to the experimental study of dissipative properties of the VT6 alloy (Ti–6Al–4V) under conditions of a homogeneous stress-strain state, which is realized on the working part of a smooth sample subjected to cyclic loading with increasing amplitude. The effects of inelastic deformation occurring in a material under cyclic loading are considered from the standpoint of thermodynamics. The research technique allows detecting irreversible changes in the thermodynamic characteristics of the sample at an early stage and determining

critical stresses at which a sharp change in the derivatives of the Gibbs potential occurs. The thermodynamic approach allowed us to hypothesize the connection of critical stresses with the points of phase transitions of the material under load.

Keywords: elastoplastic strain, strain characteristics, thermoelastic and dissipative heating, structure, phase composition

For citation: Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R. Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.

Введение

Оценка механических характеристик является необходимой и обязательной составляющей для контроля конструкционного материала [1–3]. К настоящему времени можно считать общепризнанным, что при описании процессов деформирования и разрушения уже недостаточно определения известных механических характеристик твердого тела – модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела текучести, предела прочности и т. д. Попытки описать эффекты деформирования только методами механики сплошной среды приводят к выводам о том, что наблюдаемые эффекты не очевидны [4, 5] или используемая модель неадекватно отражает действительность. Для описания наблюдаемых эффектов необходимы не только дополнительные данные о деформированном состоянии и об изменении температуры, но и адекватная модель деформирования материала. Накопленный объем экспериментальных данных убедительно свидетельствует о том, что монотонное и циклическое деформирование сопровождается эффектами перехода металлов из одной кристаллической модификации в другую или структурными изменениями [6–10]. Экспериментальных данных об изменении температуры во время этих переходов, как и описания самих переходов, недостаточно для моделирования этих процессов. Сложившуюся ситуацию можно объяснить тем, что тепловые эффекты при нагрузках, не превышающих предел текучести материала, малы, а измерение приращения температуры на образце деформируемого материала сложнее, чем измерение деформаций. Тем не менее тепловые эффекты, сопровождающие процесс деформирования, несут в себе значимую информацию об изменениях характеристик термодинамического состояния материала и должны учитываться при создании моделей деформирования и разрушения [11, 12].

В данной работе предпринята попытка рассмотреть эффекты деформирования материала, наблюдаемые при исследовании механических свойств материалов, с позиций термодинамики, которая дает самое общее представление о наблюдаемых эффектах.

Согласно термодинамическому подходу, материальное тело (исследуемый образец), а также любую его конечную или бесконечно малую часть, можно рассматривать как термодинамическую систему.

Термодинамическая система, которая обменивается веществом и энергией с окружающей средой, называется *открытой*. Если обмен веществом с окружающей средой отсутствует, но существует обмен энергии (механической, тепловой и др.), то система называется *закрытой*, а если одновременно отсутствуют и обмен веществом, и обмен энергии – *изолированной*.

Если образец при нагружении не обменивается энергией с испытательной установкой, то он может рассматриваться как *изолированная макросистема*, которая представляет собой идеальную модель и практически недостижима. Поскольку полная изоляция объекта в реальных исследованиях невозможна, то все реальные термодинамические системы относятся к открытым или закрытым.

Таким образом, если образец при нагружении обменивается энергией с испытательной установкой и средой, то он должен рассматриваться как закрытая макросистема.

До проведения опыта невозможно определить, к какому типу системы принадлежит испытываемый образец. Состояние образца, как термодинамической системы, характеризуется набором параметров состояния, которые меняются при взаимодействии со средой. К числу параметров термодинамического состояния относятся: объем, абсолютная температура, тензор деформации и нагрузка, а также параметры, учитывающие внутреннюю структуру рассматриваемого тела, которые носят название внутренних параметров состояния системы. В процессе взаимодействия со средой такая изолированная система может превратиться в закрытую.

Например, циклическое изменение нагрузки с частотой 4 Гц в области малых амплитуд может инициировать адиабатический процесс деформирования образца, который протекает без испускания и поглощения энергии и обратим. Все участки рабочей части образца в этом случае деформируются однородно, а термодинамический процесс – равновесный. Такой образец в совокупности с условиями нагружения может рассматриваться как изолированная система.

Этот же образец может превратиться в закрытую систему, если его нагружать циклически, увеличивая амплитуду нагрузки вплоть до состояния, когда будут наблюдаться эффекты необратимого процесса: наличие остаточных деформаций после разгрузки и диссипативный разогрев. Процесс деформирования в этом случае будет *неравновесным*, т. е. характеристики состояния элементов структуры в разных областях рабочей части образца будут отличаться. К свидетельствам протекания в образце неравновесного процесса деформирования можно отнести, например, появляющийся поверхностный микрорельеф на образцах при усталостных испытаниях и др. [13, 14].

Данная работа направлена на разработку методики экспериментального исследования эволюции параметров калорического и термического уравнений состояния образца при периодическом деформировании и интерпретацию характерных точек на экспериментальных зависимостях с позиций термодинамики и механики сплошной среды.

Результаты могут быть полезны при решении задачи определения параметров моделей деформирования и последующего применения в определяющих уравнениях, описывающих эволюцию термодинамической системы при различных видах нагружения.

Материалы и методы

Образец [4], подвергаемый испытаниям на усталость, изготовлен из двухфазного титанового сплава ВТ6 (Ti–6Al–4V) мартенситного класса в состоянии поставки, испытывал действие статических и циклических нагрузок, которые создавали асимметричный цикл нагружения.

Представлена программа (рис. 1), описывающая возможную траекторию выхода на режим усталостных испытаний с заданным средним напряжением, температурой теплового равновесия T , с увеличивающейся амплитудой цикла напряжений (по оси ординат – напряжение (нагрузка), по оси абсцисс – время). Знаком «*» обозначен момент достижения термодинамического равновесия после квазистатического нагружения образца.

На этапе 1 программы процесс нагружения не настолько медленный, чтобы можно было пренебречь теплопередачей. Следовательно, даже при максимальных значениях напряжения, которые меньше значений физического предела текучести, процесс деформирования будет неравновесным, а образец нельзя рассматривать как изолированную термодинамическую систему. После этапа 1 требуется некоторое время для восстановления теплового равновесия. В предварительных опытах установлено, что для возвращения образца в термически однородное состояние требуется ~3 мин.

На этапе 3 программы выполнялось циклическое нагружение с увеличивающейся амплитудой при постоянной статической нагрузке.

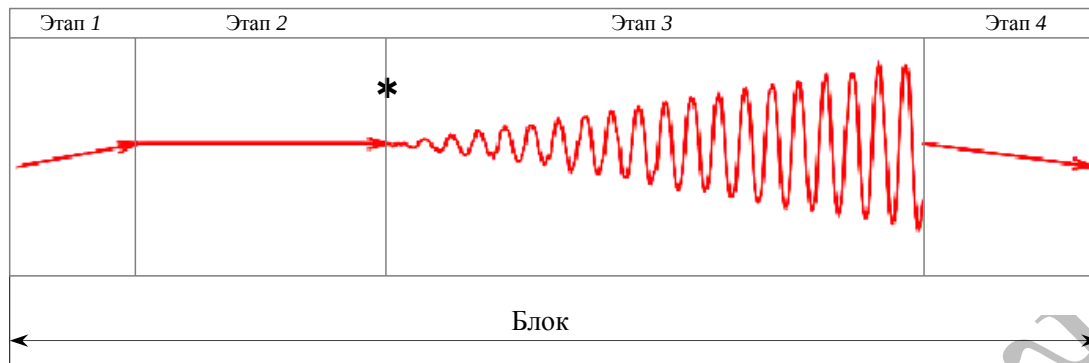


Рис. 1. Программа блока нагружения по этапам: 1 – квазистатическое; 2 – выдержка; 3 – циклическое со ступенчато увеличивающейся амплитудой напряжения до заданного значения; 4 – разгрузка

При испытаниях по программе нагружения (рис. 1) задавались средняя нагрузка f_m и амплитуда нагрузки f_a , которые на этапе 3 создавали асимметричные циклы нагрузки $f(t) = t \cdot f_a \sin(\omega t) + f_m$ и номинального напряжения $\sigma(t) = f(t)/a$ (где ω – круговая частота; t – время; a – площадь поперечного сечения образца). В рабочей части образца измеряли относительную деформацию и температуру.

Частота опроса данных составляла 100 Гц, что позволяло при циклировании образца с частотой 4 Гц получить 25 точек за цикл нагружения. Продолжительность этапа 3 составляла 600 с, что позволяло реализовать 2400 циклов нагружения. После проведения опытов файлы данных сохранялись в текстовом формате и использовались для последующего анализа – здесь и далее на этапе 3:

– $\sigma_{\max}(t), \sigma_{\min}(t)$ – экстремальные значения напряжения $\sigma(t)$;

– $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \text{const}$ – среднее напряжение в цикле, постоянное в пределах программы;

– $\sigma_a(t) = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ – амплитудные значения напряжений;

– $\varepsilon_{x\max}, \varepsilon_{x\min}$ – экстремальные значения деформаций;

– $\varepsilon_{xm} = \frac{\varepsilon_{x\max} + \varepsilon_{x\min}}{2}$ – средние полные деформации, зависящие от характеристик цикла нагружения;

– $\varepsilon_{xm}^p = \varepsilon_{xm} + \varepsilon_{xm0}$ – необратимые деформации при разгрузке до $\sigma = \sigma_m$, где ε_{xm0} – полная деформация, накопленная к концу этапа 2;

– $\varepsilon_{xa}^p = \varepsilon_{xa} - \varepsilon_{xa}^e$, где ε_{xa}^p – необратимое увеличение амплитуды цикла деформаций вследствие изменения податливости образца; ε_{xa} – амплитуда полной деформации,

$\varepsilon_{xa} = \frac{\varepsilon_{x\max} - \varepsilon_{x\min}}{2}$; ε_{xa}^e – амплитуда упругих деформаций, $\varepsilon_{xa}^e = \sigma_a / E_d^t$, E_d^t – касательный модуль упругости, определяемый экспериментально на начальном участке этапа 3;

– $\Delta T_{\max}, \Delta T_{\min}$ – экстремальные значения изменения температуры относительно температуры теплового равновесия термодинамической системы;

– $\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{2}$, $\Delta T_a = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{2}$ – средние и амплитудные значения изменения температуры.

Результаты и обсуждение

Термодинамика идеального стержня

Уравнения, описывающие связь характеристик состояния образца, рассматриваемого как термодинамическая система, можно получить по алгоритму, представленному в работе [11]:

– *первое начало* термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

где δQ – количество подведенной теплоты; dU – изменение внутренней энергии; δA – работа, совершаемая над термодинамической системой. В этом выражении Q и A – функции процесса, а U – функция состояния;

– *второе начало* термодинамики вводит функцию состояния системы (энтропию), связанную с количеством теплоты для равновесных процессов:

$$dS = \delta Q/T, \quad (2)$$

где dS – изменение энтропии; T – температура.

Изменение энтропии термодинамической системы за цикл в адиабатических равновесных процессах равно нулю $dS = 0$. В неравновесных процессах изменение энтропии такой системы положительно $dS > 0$. Следует иметь в виду, что при протекании релаксационных процессов восстановления термодинамического равновесия внутри этой системы одни элементы структуры будут отдавать тепловую энергию, и энтропия у этих элементов будет уменьшаться $dS < 0$, а другие – накапливать теплоту ($dS > 0$). Если материал образца представляет собой смесь кристаллических модификаций одного и того же вещества (смесь фаз), то каждая модификация (фаза) находится в равновесии с другой до тех пор, пока не созданы условия для перехода одной фазы в другую. Эти условия будут рассмотрены далее.

Из выражений (1) и (2) следует объединенная запись первого и второго начал термодинамики:

$$TdS = dU + \delta A. \quad (3)$$

Рассматривая образец длиной l , нагружаемый силой f , с площадью поперечного сечения $a = bh$ (где b и h – размеры прямоугольного поперечного сечения), получим исходное выражение

$$\delta A = P \cdot a dl = -f dl = -\sigma \cdot a dl, \quad (4)$$

где P – давление.

Тогда уравнение (3) можно преобразовать:

$$TdS = dU - f dl = dU - \sigma \cdot a dl. \quad (5)$$

Примечание. При описании необратимого процесса вместо выражения (4) необходимо применять неравенство $TdS > dU - f dl$.

Зависимость упругой силы f от параметров l и T образца будет определять термическое уравнение состояния:

$$f = f(l, T). \quad (6)$$

Длина стержня $l(T, f)$ при $f = 0$ будет зависеть только от температуры:

$$l(T, 0) = l(0, 0)(1 + \alpha T), \quad (7)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала.

Амплитуда относительной упругой деформации $\epsilon_{\chi a}^e$ будет определяться свойствами образца и нагрузкой f :

$$\varepsilon_{xa}^e = \frac{l(T, f) - l(T, 0)}{l(T, 0)} = \frac{1}{E_d^t} \frac{f}{a}. \quad (8)$$

Если пренебречь изменением размеров поперечного сечения a , то из уравнения (8) с учетом выражения (7) можно получить вид термического уравнения состояния:

$$f(l, T) = E_d^t a \left[\frac{l}{l_0(1 + \alpha T)} - 1 \right], \quad (9)$$

где $l_0 = l(0, 0)$, $l = l(T, f)$.

В дальнейшем будем пренебрегать изменением поперечного сечения a , так как учет этого изменения дает эффекты второго порядка малости по отношению к деформации $\Delta l/l$ [11].

Температурный коэффициент линейного расширения для твердых тел – $\alpha \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (для титана – $\alpha \approx 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), следовательно, произведение αT остается минимальным по сравнению с 1, поэтому, как и в работе [11], будем пренебрегать величинами второго порядка малости по значениям αT , тогда из уравнения (9) получим

$$f(l, T) = E_d^t a \left[\frac{l}{l_0} (1 - \alpha T) - 1 \right]. \quad (10)$$

Найдем дифференциал для энтропии – функции состояния образца:

$$dS(T, l) = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_l dT + \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T dl. \quad (11)$$

Учитывая, что $(dS)_l = \frac{(\delta Q)_l}{T}$, получим

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_l = \frac{1}{T} \frac{(\delta Q)_l}{(\partial T)_l} = \frac{1}{T} mc, \quad (12)$$

где m – масса образца; c – удельная теплоемкость материала при постоянном объеме (длине).

Для нахождения частной производной во втором слагаемом уравнения (11) используется дифференциал свободной энергии F (13) и соотношение Максвелла (14):

$$dF(T, l) = -SdT - \delta A = -SdT + fdl; \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial l \partial T} = \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial l}, \left[\frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l \right]_T = \left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)_T \right]_l. \quad (14)$$

Анализируя соотношения (13) и (14), заменим в соотношении Максвелла

$\left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l$ на $-S$, а $\left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)_T$ на f и получим

$$-\left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T = \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l. \quad (15)$$

Тогда уравнение (11) можно переписать как

$$dS(T, l) = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_l dT - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l dl. \quad (16)$$

На основании термического уравнения (9), частная производная во втором слагаемом уравнения (16) может быть представлена следующим образом:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l = -\frac{\alpha E_d^t a l}{l_0}. \quad (17)$$

После подстановки выражения (17) в уравнение (16) параметр dS можно представить как

$$dS = \frac{mcdT}{T} + \frac{\alpha E_d^t \cdot a dl}{l_0}. \quad (18)$$

После интегрирования уравнения (18) получим

$$S - S^* = \int_{T^*}^T \frac{mcdT}{T} + \int_{l^*}^l \frac{\alpha E_d^t \cdot a dl}{l_0}, \quad (19)$$

где S^* – значение функции состояния; T^* и l^* – параметры состояния, обозначенного знаком «*» на рис. 1, по отношению к которому определяется изменение энтропии в текущем процессе.

Формула для изменения энтропии приобретает вид

$$S - S^* = mc \ln \frac{T}{T^*} + \frac{\alpha E_d^t a (l^2 - (l^*)^2)}{2l_0}. \quad (20)$$

В равновесном адиабатическом процессе деформирования из уравнения (18) для малых циклических изменений температуры ΔT_a и малых амплитуд деформаций ε_{xa}^e получим

$$\frac{\Delta T_a}{T} = \frac{\alpha E_d^t a l}{mc} \cdot \frac{\Delta l}{l} = - \frac{\alpha E_d^t}{\rho c} \cdot \varepsilon_{xa}^e = - \frac{\alpha}{\rho c} \cdot \sigma_a, \quad (21)$$

где $\frac{\Delta T_a}{T}$ – амплитуда относительного приращения температуры при амплитуде относительной деформации; $\varepsilon_{xa}^e = \Delta l / l$; ρ – плотность; c – теплоемкость материала; α – температурный коэффициент линейного расширения; σ_a – амплитуда циклических напряжений, вызывающая адиабатический процесс деформирования при циклическом нагружении образца на этапе 3 программы (рис. 1).

На рис. 2 представлена типичная экспериментальная зависимость амплитуды температуры образца (ΔT_a) от амплитуды напряжения (σ_a) со средним напряжением в цикле $\sigma_m = 420$ МПа.

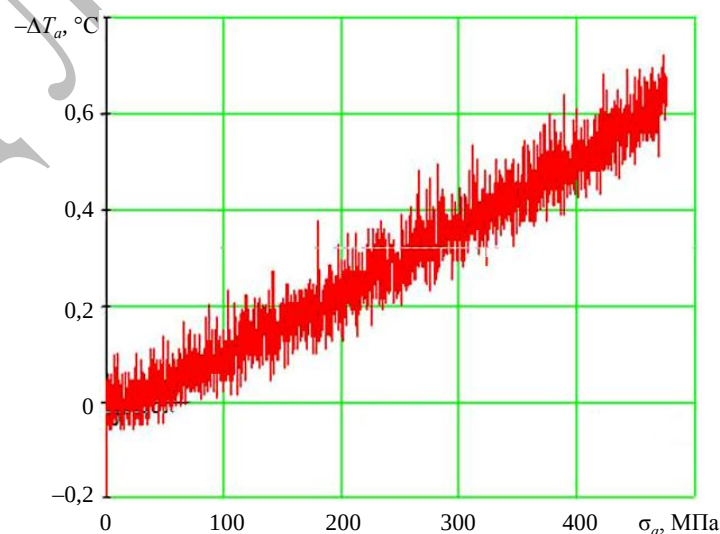


Рис. 2. Термоупругие изменения температуры на этапе 3 в программе блока нагружения

Пропорциональная зависимость ΔT_a от σ_a ($\varepsilon_{\text{ха}}^e$ – деформации), представленная на рис. 2, свидетельствует о постоянстве коэффициентов в соотношениях (21) – в частности, о постоянстве касательного модуля и плотности материала.

Согласие экспериментальной кривой с пропорциональной зависимостью, получаемой по теоретической формуле для идеального адиабатического процесса, свидетельствует о том, что предположение об идеальности процесса в исследуемом диапазоне амплитуд напряжений – верно.

Следует обратить внимание на то, что предположение об идеальности процесса оказывается справедливым только для зависимости амплитуды температуры образца от амплитуды напряжения. Зависимость изменений температуры ΔT_m образца от амплитуды напряжения оказывается существенно нелинейной и рассматривается далее.

Термодинамика фазовых переходов при циклическом деформировании

Термодинамика фазовых переходов в области максимальных напряжений

Уравнения (19) и (20) для вычисления энтропии не содержат членов, описывающих эффекты неравновесного деформирования, и могут рассматриваться как модель «идеального» материала, описывающая равновесные процессы деформирования.

Исследуемый сплав ВТ6 является двухфазным. В процессе нагружения образца могут возникнуть условия, нарушающие равновесие фаз, и условия для перехода исходной фазы в иную. Эти условия могут возникнуть при температуре, меньшей температуры полиморфного превращения, в условиях, когда необходимое количество теплоты термодинамической системы можно сообщить при деформировании.

Для анализа фазовых переходов при деформировании будем применять метод термодинамических потенциалов, который основан на использовании свойств полного дифференциала.

Поскольку большинство испытаний на усталость протекает при условии постоянства средних значений силы и температуры, то в качестве критериев направленности термодинамического процесса и равновесия в термодинамической системе в данном случае имеет место изменение энергии Гиббса. Термодинамические потенциалы рассматриваются как критерии направленности процесса и равновесия в термодинамической системе. В самопроизвольном процессе при постоянных соответствующих параметрах термодинамические потенциалы уменьшаются, а при равновесии – они минимальны. В устойчивом положении термодинамический потенциал имеет минимальное значение, в неустойчивом – локальный максимум.

После выполнения этапа 2 программы нагружения достигнуто равновесное состояние образца (потенциал Гиббса имел локальное минимальное значение). На этапе 3 выполнялось нагружение образца увеличивающейся циклической нагрузкой при постоянном среднем значении напряжения. Опытным путем установлено, что в упругой области деформирования гармоническое нагружение вызывает гармоническое изменение температуры и деформации со сдвигом по фазе на 180 и ноль градусов соответственно. При достижении некоторой «критической» нагрузки (напряжения) наблюдались эффекты, характерные для самопроизвольного необратимого процесса: разогрев и остаточные деформации в рабочей части образца. Такие процессы возможны при существовании другого смежного равновесного состояния термодинамической системы с иным фазовым составом.

Введем в рассмотрение термодинамический потенциал Гиббса $G(T, P)$. Термодинамический потенциал Гиббса и его полный дифференциал $dG(T, P)$ зависят от переменных T и P :

$$G(T, P) = U - ST + PV, \quad (22)$$

$$dG(T, P) = -SdT + VdP, \quad (23)$$

где V – объем образца.

Согласно классификации фазовых переходов по Эренфесту, при фазовом переходе первого рода в равновесном процессе испытывают скачок первые частные производные в уравнении (21):

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S, \quad (24)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = V. \quad (25)$$

С учетом того, что при растяжении образца силой f давление определится как $P = -f/a$, а объем как $V = al$, выражения (22), (24) и (25) изменятся:

$$G(T, f) = U - ST - fl, \quad (26)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_f = -S, \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial f}\right)_T = -l. \quad (28)$$

Примечание. Реальные процессы деформирования будут неравновесными, а скачки будут размыты, так как процесс фазового перехода может проходить неодновременно в разных областях рабочей части образца.

Учитывая, что во время фазового перехода сила f и температура T постоянны, из выражения (2) следует, что величина скачка энтропии ΔS определяется величиной теплоты перехода, отнесенной к температуре превращения: $\Delta S = \frac{1}{T} \int \delta Q \neq 0$, а также $\Delta V \neq 0$ (или $\Delta l \neq 0$). Таким образом, фазовый переход первого рода требует выделения или поглощения теплоты, характеризуется постоянством температуры и скачкообразным изменением энтропии и объема (или длины) стержня. При фазовом переходе первого рода $dG(T, f) = 0$.

На рис. 3 показана эволюция средней составляющей цикла деформаций ε_{xm}^p (красная линия), описывающая необратимое изменение длины l в выражении (28), и средней температуры за цикл нагружения ΔT_m (синяя линия) от амплитуды напряжений на этапе 3 программы испытаний (образец 6 – см. таблицу).

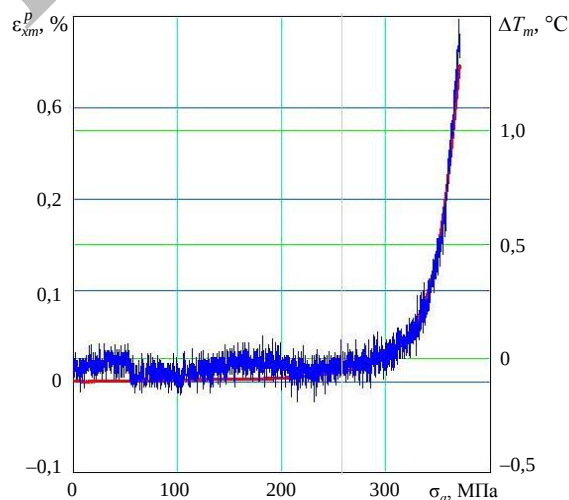


Рис. 3. Зависимости средней составляющей цикла деформаций (—) и приращений средней температуры (—) от амплитуды напряжений

Судя по графику ε_{xm}^p , можно полагать, что при критической амплитуде цикла ~ 250 МПа скачком меняется необратимая деформация и длина рабочей части. Процесс накопления пластической деформации при циклическом нагружении в механике сплошной среды называют «ратчетингом», а параметр ε_{xm}^p – деформацией «вышагивания».

По графику ΔT_m видно, что характеристика термодинамического состояния меняется скачком при той же амплитуде напряжения, что и пластическая деформация.

Если учесть установленную адиабатичность процесса периодического деформирования с частотой 4 Гц, то можно предположить, что скачок ΔT_m обусловлен скачком энтропии в результате высвобождения теплоты при пластическом деформировании и фазовом переходе.

Эволюции средней составляющей цикла деформации ε_{xm}^p и ее приращения исследовали при разных соотношениях критических амплитуд σ_a и средних напряжений σ_m .

Критическое напряжение ($\sigma_{\max}$) при разных соотношениях критических амплитуд (σ_a) и средних напряжений (σ_m)

Условный номер образца	σ_a	σ_m	$\sigma_{\max}$
	МПа		
1	460	423	883
2	360	529	889
3	250	635	885
4	250	635	885
5	250	635	885
6	360	529	889

Из данных таблицы видно, что во всех испытаниях скачок наблюдался при максимальном критическом напряжении $\sigma_{\max}$, близком к физическому пределу текучести.

Можно предположить, что скачкообразная эволюция деформации на рис. 3 обусловлена мартенситными превращениями в сплаве при максимальных напряжениях, близких к пределу текучести материала, и по классификации Эренфеста определяется как фазовый переход первого рода – выражения (27) и (28).

В данной работе для проверки предположения о наличии фазового перехода после циклического деформирования в области предела текучести выполняли рентгеноструктурный анализ образцов до деформирования и после усталостного разрушения.

На рис. 4 представлены дифрактограммы трех образцов до (1) и после деформирования (2 и 3); дифрактограммы 2 и 3 образцов на удалении от места разрушения от края на 1 см и непосредственно у края места разрушения соответственно.

При сопоставлении дифрактограмм для образцов 1 и 2 обнаружены изменения интенсивности пиков, что свидетельствует об изменении текстуры материала и его фазового состава в рабочей части образца после усталостных испытаний. При сопоставлении дифрактограмм образцов 1 и 3 (у места разрушения) значимых изменений не выявлено, что оказалось неожиданным.

Отсутствие фазовых превращений вблизи места разрушения образца можно объяснить тем, что на участке долома преобладают сдвиговые деформации – разрушение сопровождается образованием шейки, поверхность разрушения сформирована плоскостями разделения, расположенными под углом, близким к 45 градусам к направлению нагрузки. На удалении от места разрушения преобладают осевые деформации. Это обстоятельство проанализировано в работе [15], а также показано, что кристаллическая

решетка исследуемого фрагмента будет иметь ту форму, которая энергетически более выгодна, что и наблюдается в исследовании, представленном в данной работе.

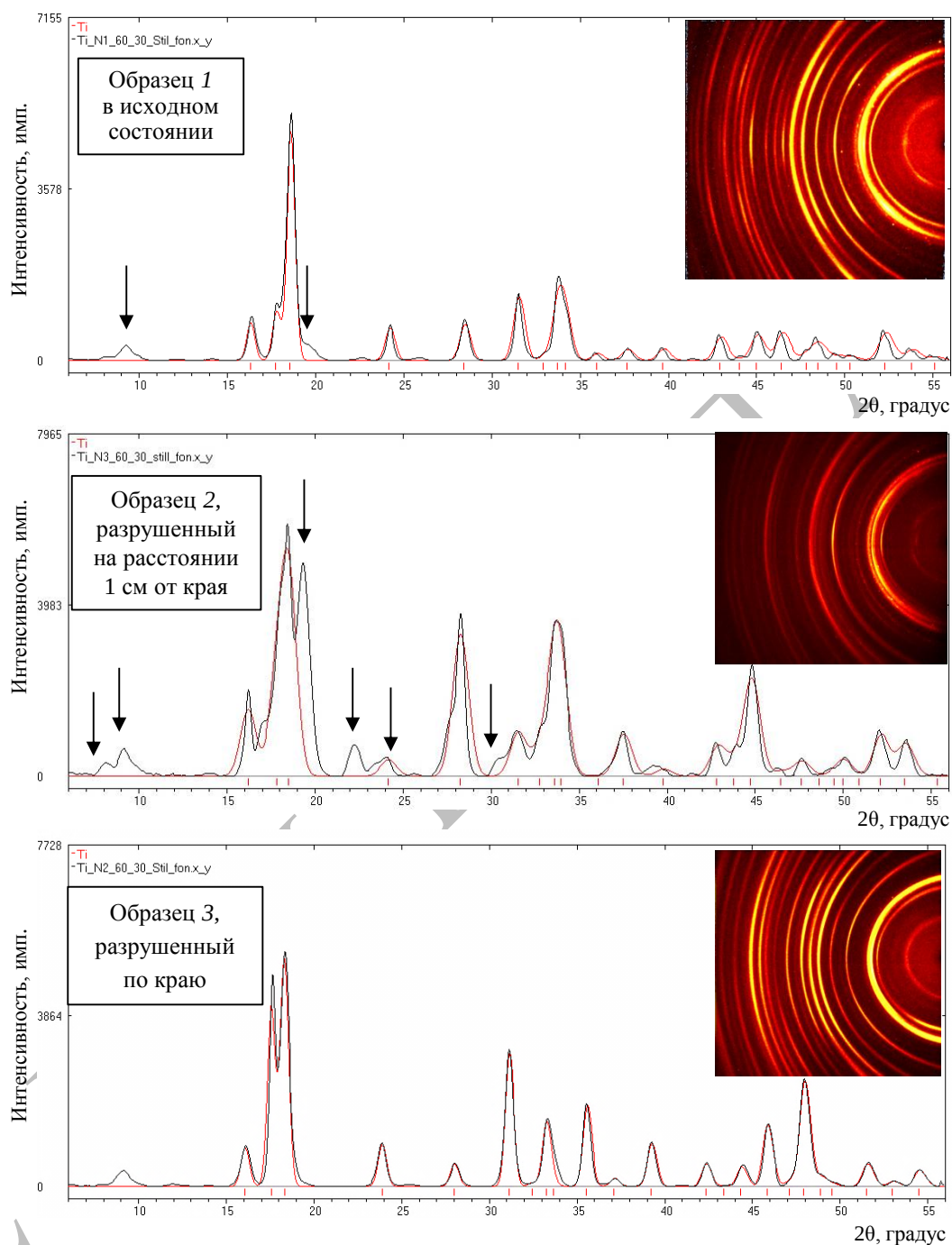


Рис. 4. Дифрактограммы образцов, вырезанных из разных мест образца титанового сплава ВТ6 (дифрактометр X8APEX фирмы Bruker, Mo K_{α} -излучение). На вставках показаны лауэ-граммы, стрелками – рефлексы нерасшифрованных фаз

В работах [6–8] установлено, что мартенсит деформации после нагружения в низколегированных сталях и титановом сплаве появляется в области напряжений, соответствующих пластическому течению. Пластическая деформация активизирует распад метастабильных твердых растворов и вызывает превращения в метастабильных фазах.

Таким образом, представленные ранее результаты исследований подтверждают предположение о фазовом переходе в области максимальных напряжений при деформировании с амплитудой напряжения больше «критической».

Термодинамика фазовых переходов в области минимальных напряжений

Известно, что пластическое течение может существовать не только при прямом нагружении, но и при разгрузках. Естественно предположить, что фазовый переход может существовать и при разгрузках, т. е. в области минимальных напряжений цикла.

Для реализации фазового перехода при минимальных напряжениях можно, например, выполнить нагружение образца силой $f(t)$ (где $f_m < 0$) или с использованием эффект Баушингера вызвать снижение предела текучести при минимальных напряжениях, испытывая образец после предварительного нагружения. В данной работе использовали второй способ.

На рис. 5 показана эволюция средней температуры и необратимых амплитуд ε_{xa}^p на этапе 3 (рис. 1) образцов в состоянии поставки (рис. 5, кривые 1) и после предварительного нагружения (рис. 5, кривые 2) (в данной работе рассматриваются только кривые 2, а для кривых 1 будет проведен последующий анализ).

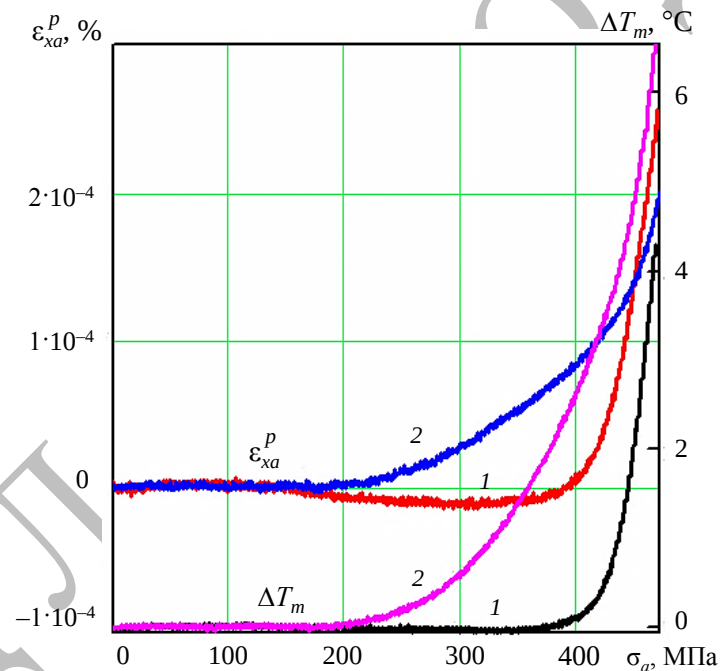


Рис. 5. Эволюция амплитуды пластической деформации и температуры от амплитуды напряжений для двух разных состояний сплава ВТ6: 1 – состояние поставки; 2 – при нагружении вторым блоком программы

По графикам зависимостей ΔT_m и ε_{xa}^p от амплитудных напряжений видно, что при «критических» амплитудах ~ 200 МПа наблюдается активизация характеристики термодинамического состояния и увеличение длины образца.

Можно предположить, что скачкообразная эволюция деформации и температуры на рис. 5 обусловлена мартенситными превращениями в сплаве при минимальных напряжениях, близких к пределу текучести материала при разгрузке, и определяется как фазовый переход первого рода из выражений (27) и (28).

Примечание. Зависимость необратимых амплитуд образца ε_{xa}^p на рис. 5 можно преобразовать в зависимость секущего модуля упругости от амплитуды напряжений (как это сделано в работе [4]) и получить его резкое снижение после нагружения больше «критического» уровня напряжений.

Таким образом, представленный ранее результат подтверждает предположение о фазовом переходе при деформировании в области минимальных напряжений с амплитудой напряжения больше «критической».

Эволюция фазовых переходов при деформировании

На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости средней температуры образцов ΔT_m и необратимых средних деформаций образца ε_{xm}^p при первом и втором нагружении образца.

Анализ графиков (рис. 5 и 6) позволяет установить закономерность эволюции скачков («критических» амплитуд) при испытании сплава на усталость.

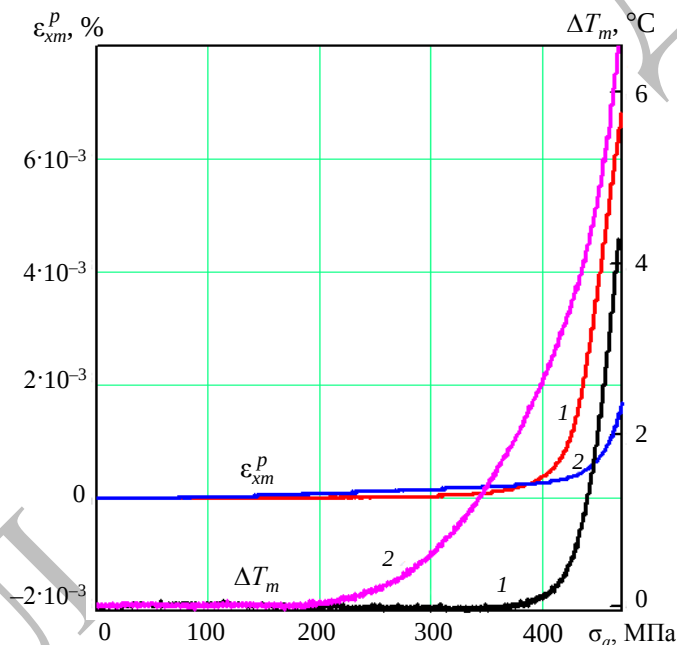


Рис. 6. Эволюция средней пластической деформации и температуры от амплитуды напряжений для двух разных состояний сплава ВТ6: 1 – состояние поставки; 2 – при нагружении вторым блоком программы

При первом нагружении «критические» амплитуды напряжений, определяемые для образца в состоянии поставки (кривые 1 на рис. 5 и 6) практически совпадают и лежат в области напряжений 360 МПа. «Критические» амплитуды изменили свою величину после второго блока программы нагружения (кривые 2). Скачки обнаружили при амплитуде напряжений 200 МПа на рис. 5 (зависимости ε_{xa}^p и ΔT_m), а на рис. 6 при амплитуде напряжения 420 МПа (зависимость ε_{xm}^p) и 200 МПа (зависимость ΔT_m).

С увеличением числа блоков нагружения критические амплитуды напряжения продолжают эволюционировать в указанных ранее направлениях вплоть до разрушения образца.

Заключения

Описываемая эволюция критических напряжений известна в механике сплошной среды. Увеличение максимального критического напряжения, определяемого по скачку накопления средней деформации за цикл ε_{xm}^p , известно как эффект упрочнения при нагружении больше предела текучести. Уменьшение критической амплитуды, определяемой по скачку приращения средней температуры за цикл ΔT_m или по скачку амплитуды необратимой деформации ε_{xa}^p , известно как эффект разупрочнения материала после предварительного нагружения или как эффект Баушингера. Оба эффекта сопровождают процесс усталостного повреждения материала.

Таким образом, привлечение физических методов для исследования эффектов деформирования позволяет получить дополнительную информацию при решении проблемы усталостного разрушения. В частности, термодинамический подход позволил высказать гипотезу о связи критических напряжений с точками фазовых переходов материала под нагрузкой.

Если принять во внимание то, что термодинамический потенциал Гиббса, отнесенный к одному элементарному элементу структуры, является химическим потенциалом материала, то важно отметить, что, применяя в исследовании усталости физические методы, не следует исключать из рассмотрения и химические методы исследования свойств образцов в процессе усталости. Отметим также, что изменение химического потенциала материала после деформирования, несомненно, будет приводить к изменению коррозионной стойкости материала, что важно учитывать при выборе материала и технологии его обработки.

Для описания процесса деградации материала при усталостных испытаниях нужна информация об исходном фазовом составе материала и о кинетике его распада и формирования новых фаз. Знание этих процессов позволит описать эволюцию материала вплоть до разрушения и понять природу усталостного разрушения.

Список источников

1. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
2. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 3–8.
3. 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.
4. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Shutov A.V. On the analysis of energy dissipation and ratcheting during cyclic deformation of the titanium alloy VT6 (Ti–6Al–4V) // Journal of Physics: Conference Series. VIII International Conference «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials». 2020. Vol. 1431. Art. 012025.
5. Капустин В.И., Гилета В.П., Захарченко К.В. Экспериментальное изучение закономерностей деформирования алюминиевых сплавов при регулярных нагружениях // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 4 (53). С. 40–43.
6. Манохин С.С., Иванов М.Б., Колобов Ю.Р. Структурные и фазовые превращения орторомбического мартенсита в $(\alpha + \beta)$ -титановом сплаве BT16 при деформационном и термическом воздействии // Научные ведомости. Сер.: Математика. Физика. 2011. Т. 106. № 11. Вып. 23. С. 65–68.
7. Glage A., Weidner A., Biermann H. Effect austenite stability on the low cycle fatigue behaviour and microstructure of high alloyed metastable austenitic cast TRIP-steels // Procedia Engineering. 2010. Vol. 2. P. 2085–2094.

8. Weidner A., Glage A., Biermann H. In-situ characterization of the microstructure evolution during cyclic deformation of novel cast TRIP-steel // *Procedia Engineering*. 2010. Vol. 2. P. 1961–1971.
9. Терентьев В.Ф., Добаткин С.В., Просвирнин Д.В. и др. Усталостная прочность аустенитной стали X18H10T после равноканального углового прессования // *Деформация и разрушение материалов*. 2008. № 10. С. 30–38.
10. Макаров А.В., Саврай Р.А., Счастливцев В.М. и др. Структурные особенности поведения высокоуглеродистой перлитной стали при циклическом нагружении // *Физика металлов и металловедение*. 2011. Т. 111. № 1. С. 97–111.
11. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. М.: Наука, 1972. 400 с.
12. Белов Г.В., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
13. Перевалова О.Б., Панин А.В., Казаченок М.С., Синякова Е.А. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структурно-фазовые превращения в титановом сплаве Ti–6Al–4V // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25. № 1. С. 66–77.
14. Панин В.Е., Егорушкин В.Е. Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система // *Физическая мезомеханика*. 2011. Т. 14. № 3. С. 7–26.
15. Аннин Б.Д., Остросаблин Н.И., Угрюмов Р.И. Применение собственных модулей и состояний для оценки возможности фазовых переходов в сплавах с памятью формы // *Прикладная математика и техническая физика*. 2021. Т. 62. № 5. С. 5–14.

References

1. Troshchenko V.T. *Deformation and destruction of metals under high-cycle loading*. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 344 p.
2. Kablov E.N. Quality control of materials – a guarantee of the safety of aviation equipment operation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
3. 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.
4. Zakharchenko K.V., Kapustin V.I., Shutov A.V. On the analysis of energy dissipation and ratcheting during cyclic deformation of the titanium alloy VT6 (Ti–6Al–4V). *Journal of Physics: Conference Series. VIII International Conference "Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials"*, 2020, vol. 1431, art. 012025.
5. Kapustin V.I., Gileta V.P., Zakharchenko K.V. Experimental study of the laws governing the deformation of aluminum alloys under regular loading. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 2011, no. 4 (53), pp. 40–43.
6. Manokhin S.S., Ivanov M.B., Kolobov Yu.R. Structural and phase transformations of orthorhombic martensite in ($\alpha + \beta$)-titanium alloy VT16 under deformation and thermal impact. *Nauchnye Vedomosti. Ser.: Mathematics. Physics*, 2011, vol. 106, no. 11, is. 23, pp. 65–68.
7. Glage A., Weidner A., Biermann H. Effect austenite stability on the low cycle fatigue behavior and microstructure of high alloyed metastable austenitic cast TRIP-steels. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, pp. 2085–2094.
8. Weidner A., Glage A., Biermann H. In-situ characterization of the microstructure evolution during cyclic deformation of novel cast TRIP-steel. *Procedia Engineering*, 2010, vol. 2, pp. 1961–1971.
9. Terentiev V.F., Dobatkin S.V., Prosvirnin D.V. Fatigue strength of Kh18N10T austenitic steel after equal-channel angular pressing. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2008, no. 10, pp. 30–38.
10. Makarov A.V., Savray R.A., Schastlivtsev V.M. Structural features of the behavior of high-carbon pearlitic steel under cyclic loading. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 97–111.
11. Rumer Yu.B., Ryvkin M.Sh. *Thermodynamics, statistical physics and kinetics*. Moscow: Nauka, 1972, 400 p.

12. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic modeling of chemically reacting systems*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2013, 96 p.
13. Perevalova O.B., Panin A.V., Kazachenok M.S., Sinyakova E.A. Influence of ultrasonic impact treatment on structural-phase transformations in titanium alloy Ti-6Al-4V. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 66–77.
14. Panin V.E., Egorushkin V.E. Deformable solid body as a nonlinear hierarchically organized system. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2011, vol. 14, no. 3, pp. 7–26.
15. Annin B.D., Ostrosablin N.I., Ugryumov R.I. Application of eigenmodules and states to assess the possibility of phase transitions in shape memory alloys. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika*, 2021, vol. 62, no. 5, pp. 5–14.

Информация об авторах

Капустин Владимир Иванович, доцент, к.т.н., Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), rector@nstu.ru

Захарченко Кирилл Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н., Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (ИГиЛ СО РАН), igil@hydro.nsc.ru; Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), rector@nstu.ru

Черепанова Вера Корнилиевна, профессор, д.ф.-м.н., Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), rector@nstu.ru; Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН), admin@itam.nsc.ru.

Шаяпов Владимир Равильевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН (ИНХ СО РАН), niic@niic.nsc.ru

Information about the authors

Vladimir I. Kapustin, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), Novosibirsk State Technical University, rector@nstu.ru

Kirill V. Zakharchenko, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, igil@hydro.nsc.ru; Novosibirsk State Technical University, rector@nstu.ru

Vera K. Cherepanova, Professor, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, rector@nstu.ru; Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, admin@itam.nsc.ru

Vladimir R. Shayapov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, niic@niic.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 28.06.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.07.2022.

The article was submitted 28.06.2022; approved and accepted for publication after reviewing 05.07.2022.

Научная статья

УДК 669.017

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-112-122

ИССЛЕДОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЙМ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Л.В. Морозова¹, А.А. Левченко¹

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

Аннотация. Проведено комплексное исследование трех обойм ротора генератора, изготовленных из стали 35ХГСЛ, со вставками из мельхиора марки МнМц60-20-20, после эксплуатации и дополнительных испытаний в условиях влажной среды и повышенной температуры. Методами оптической и электронной микроскопии, химического анализа и неразрушающего контроля оценена макро- и микроструктура, изучен химический состав и строение изломов деталей. Установлено, что эксплуатация обойм ротора генератора в условиях повышенной температуры и влажности приводит к отслоению защитного никелевого покрытия и образованию коррозионных питтингов на стальных участках. Эксплуатация в условиях среды, содержащей серу, приводит к зарождению трещин и развитию межкристаллитной коррозии.

Ключевые слова: фрактография, трещина, обойма, сталь, мельхиор, агрессивная среда, защитное покрытие

Для цитирования: Морозова Л.В., Левченко А.А. Исследование биметаллических обойм ротора генератора после эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 10. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-112-122.

Scientific article

RESEARCH OF BIMETALLIC HOLDERS OF GENERATOR ROTOR AFTER OPERATION

L.V. Morozova¹, A.A. Levchenko¹

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

Abstract. Complex research of three holders of generator rotor, made of 35KhGSL steel with inserts of MnMts60-20-20 cupronickel is conducted after operation and additional tests in humid environment and elevated temperature conditions. Chemical composition and structure of parts fatigue has been studied and macro- and microstructure has been evaluated by the methods of optical and electron microscopy, chemical analysis and non-destructive testing. It is established that the operation of generator rotor holders under conditions of high temperature and humidity leads to delamination of protective nickel coating and formation of petting corrosion on the steel sections. Operation in an environment containing sulfur leads to the initiation of cracks and the development of intercrystallite corrosion.

Keywords: fractography, crack, holder, steel, cupronickel, hostile environment, protective coating

For citation: Morozova L.V., Levchenko A.A. Research of bimetallic holders of generator rotor after operation. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 10. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-112-122.

Введение

От качества исходных материалов и точности изготовления деталей, являющихся частью сложных технических систем, зависит их надежность и долговечность. Важнейшими задачами современного материаловедения является как повышение надежности эксплуатируемого изделия, так и своевременная диагностика его состояния [1, 2]. Своевременный ремонт или замена деталей приводят не только к увеличению рабочего ресурса сложной технической системы, но и к предотвращению ее разрушения вследствие выхода из строя входящих в нее деталей.

Биметаллические обоймы ротора генератора подвергались дополнительному воздействию температуры и коррозионно-активной среды, после чего проводилось комплексное исследование состояния материала обойм и оценка сохранения их работоспособности.

Исследуемые обоймы (втулки) ротора генератора с условными номерами 1–3 состоят из чередующихся зон магнитного (сталь 35ХГСЛ) и немагнитного (мельхиор марки МнМц60-20-20) материалов, объединяемых методом намораживания. Магнитная сталь в данном случае выступает в качестве полюсного наконечника генератора, а медно-никелевый мельхиор образует немагнитные зоны между полюсными наконечниками [3, 4].

Литейная конструкционная легированная сталь 35ХГСЛ обладает низкой коррозионной стойкостью в связи с невысоким содержанием хрома (0,7–1,0 % (по массе)) и нуждается в нанесении защитных покрытий перед эксплуатацией. Соответственно, повреждение защитного покрытия является фактором, значительно снижающим остаточный ресурс изделия [5, 6]. Для данной стали также необходим контроль содержания серы и фосфора – вредных примесей, повышающих склонность к образованию горячих трещин и вызывающих хрупкость при пониженных температурах. Так, в отливках особо ответственного назначения количество каждого из этих элементов не должно превышать 0,05 % (по массе). Сталь 35ХГСЛ применяется для изготовления зубчатых колес, звездочек, осей, валов, муфт и других ответственных деталей, от которых требуется повышенная износостойкость [7, 8].

Мельхиор МнМц60-20-20 представляет собой дисперсионно-твердеющий сплав системы Cu–Ni–Mn.

В процессе эксплуатации обоймы подвергаются перепадам температур, вибрационным нагрузкам, воздействию атмосферной влажности и серосодержащих выхлопных газов, соответственно, существует опасность развития атмосферной и газовой типов коррозии [9]. Газовая коррозия поражает металлические аппараты и детали, которые работают в условиях воздействия агрессивных газов и при повышенной температуре. Газы, содержащие серу, такие как H_2S и SO_2 , являются наиболее агрессивными по отношению к большинству металлов. Температура, давление, скорость движения среды, а также состав и структура металла, наличие внутренних напряжений в металле, характер обработки поверхности и т. д. напрямую влияют на характер протекания процесса химической коррозии и его скорость. Соединения серы, водяные пары и кислород оказывают наиболее сильное влияние на окисление сталей. Наличие в воздухе паров воды увеличивает скорость коррозии стальных деталей как минимум вдвое. Присутствие соединений серы в газовой среде зачастую приводит к развитию межкристаллитной коррозии в сталях (особенно при повышенных температурах), так как повышение температуры способствует ускорению процессов окисления. Скорость окисления металлов также увеличивает их переменное нагревание и охлаждение, так как от перепада температур образовавшаяся оксидная пленка начинает трескаться и может отслаиваться от поверхности детали. Увеличение скорости движения газовой среды вначале приводит к возрастанию скорости окисления металлов, но сформировавшаяся оксидная пленка

затрудняет последующее окисление поверхности и в дальнейшем скорость окисления практически не изменяется. На скорость газовой коррозии влияет и характер обработки поверхности металла – чем лучше качество обработки детали, тем медленнее идет процесс ее окисления. Это связано с тем, что от шероховатых поверхностей быстрее отслаиваются защитные пленки. Коррозионную стойкость металла также снижают внутренние напряжения, возникающие в результате термообработки и различных деформационных процессов [10].

Для защиты от коррозионных процессов на поверхность материалов, не являющихся коррозионностойкими, наносят защитные покрытия. Это могут быть как лакокрасочные покрытия, выполняющие защитно-декоративные функции, так и более сложные покрытия на основе металлов, полимеров и керамики [11–14]. На наружную поверхность исследуемых обоев ротора генератора наносили защитное лакокрасочное покрытие, а на внутреннюю поверхность – гальваническое никелевое покрытие.

Цель данной работы – установление причин и характера трещин, образовавшихся в материале обоев ротора генератора и проверка качества материала для оценки влияния длительности и условий эксплуатации на работоспособность деталей.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Для оценки состояния материала, обоев ротора генератора, отработавшие в течение 744 ч, подвергали дополнительному воздействию неблагоприятных факторов:

- обоему 1 эксплуатировали в течение 744 ч, дополнительно выдерживали при температуре -60°C в течение 2 сут, при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ в течение 3 сут и при повышенной влажности в течение 10 сут;
- обоему 2 эксплуатировали в течение 744 ч и дополнительно испытывали на вращение при 7600 об/мин в течение 750 ч;
- обоему 3 эксплуатировали в течение 970 ч в условиях серосодержащей среды без дальнейших испытаний.

Исследования втулок ротора генератора выполняли методами оптической и электронной микроскопии, а также металлографии высокого разрешения на оптическом микроскопе фирмы Leica и растровом микроскопе EVO MA10.

Исследование химического состава материала обоев выполняли методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа на приборе S4 Explorer на соответствие требованиям ГОСТ 977–88 для марки стали 35ХГСЛ и ГОСТ 24231–80 – для мельхиора МнМц60-20-20.

Микротвердость HV определяли на микротвердомере Leica VMHT с нагрузкой 100 г, твердость HB определяли на твердомере Durovision-300 при использовании стального шарика диаметром 5 мм.

Неразрушающий контроль после снятия лакокрасочного покрытия проводили набором дефектоскопических материалов ЛЮМ 33-ОВ с особо высоким классом чувствительности по ГОСТ 18442–80 состава: пенетрант ЛЖ-18НВ (ТУ 2662-010-73057924–2004), очиститель ОЖ-7А (ТУ 2662-009-73057924–2004) и проявитель ПР-15А (ТУ 2662-011-73057924–2004). Для проведения люминесцентного контроля применяли следующую аппаратуру и средства контроля: сушильный шкаф BINDER; УЗВ-ванну; краскораспылитель КРП-10; УФ-лампу ZB-100F; образец фирмы Helling с искусственными дефектами глубиной 10 мкм и раскрытием 0,5 мкм; тест-панель PSM-5.

Результаты и обсуждение

Типичный внешний вид обойм ротора генератора до и после снятия лакокрасочного покрытия представлен на рис. 1 (на позиции *в* показана внутренняя поверхность обоймы).

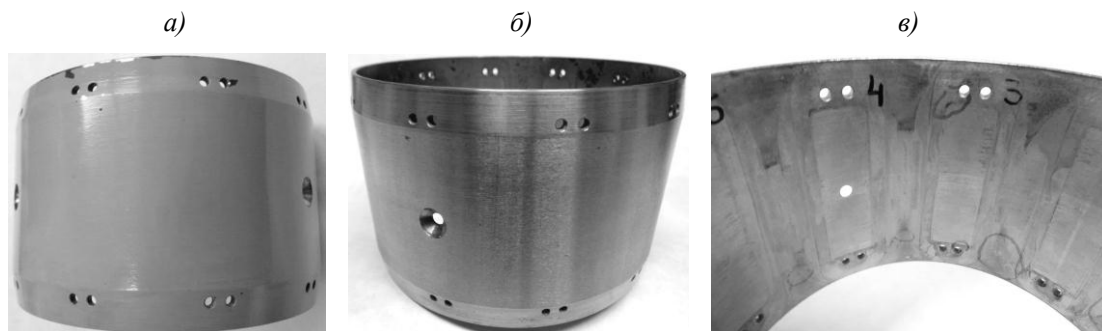


Рис. 1. Типичный внешний вид обоймы ротора генератора до (*а*) и после (*б*) снятия лакокрасочного покрытия: *а, б* – наружная поверхность; *в* – внутренняя поверхность с гальваническим никелевым покрытием

На наружной поверхности всех трех обойм наблюдаются незначительные повреждения лакокрасочного покрытия. Обойма 1 также имеет коррозионные поражения в центральных отверстиях. На внутренней поверхности детали в местах, не закрытых катушками и клиньями генератора, наблюдается потемнение и отслоение никелевого покрытия. Наиболее выраженное повреждение покрытия наблюдается в участках между мельхиоровыми вставками и вокруг парных отверстий меньшего диаметра (рис. 2, *а, б*).

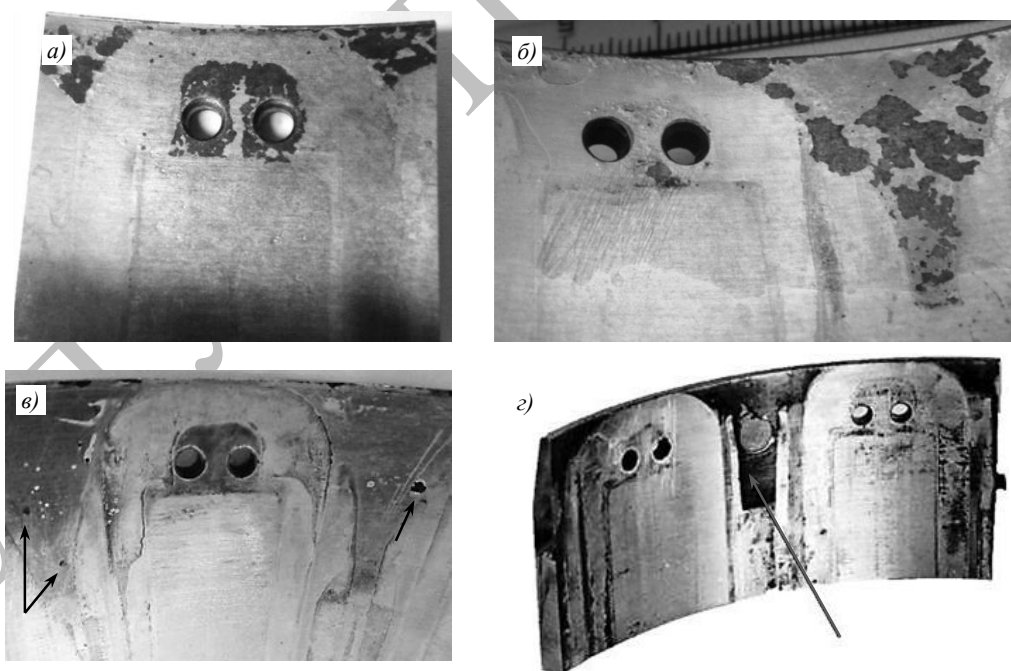


Рис. 2. Вид дефектов на внутренней поверхности обойм 1 (*а, б*), 2 (*в*) и 3 (*г*); на *в* стрелками показаны точечные повреждения, а на *г* – место возникновения трещины

В обойме 2 присутствуют лишь отдельные точечные повреждения никелевого покрытия на внутренней поверхности (рис. 2, *в* – показаны стрелками).

На внутренней поверхности обоймы 3 на незакрытых катушках и клиньях генератора участках расположены темные шероховатые области с частично или полностью отслоившимся защитным никелевым покрытием (рис. 2, ε – показано стрелкой). С помощью оптического микроскопа в темных участках с нарушенным или отсутствующим покрытием выявлено наличие трещин.

Люминесцентный контроль поверхности обойм ротора генератора выявил дефекты, соответствующие I классу чувствительности по ГОСТ 18442–80. При проведении исследования биметаллических обойм 1–3 по всей наружной поверхности деталей выявлено фоновое яркое желто-зеленое свечение в виде точечных индикаторных следов. При обследовании внутренней поверхности деталей в обойме 1 выявлено интенсивное свечение множества индикаторных следов (рис. 3), в обойме 2 обнаружены лишь точечные индикаторные следы, в то время как в обойме 3 подтверждено присутствие трещин, выявленных ранее при помощи оптического анализа.

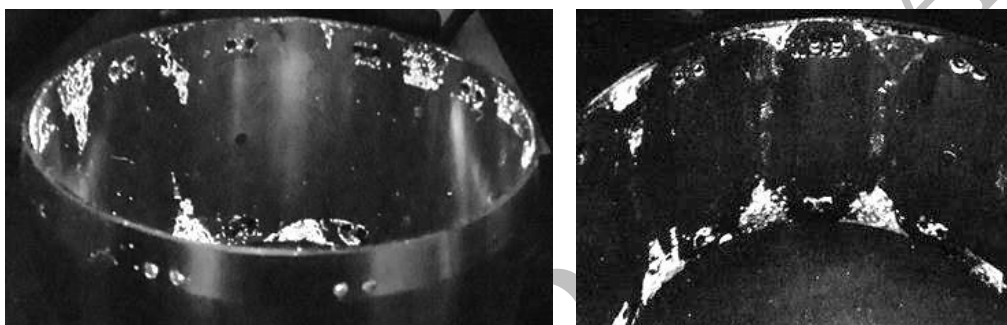


Рис. 3. Индикаторные следы, полученные при люминесцентном контроле на внутренней поверхности обоймы 1

Определение химического состава материала обойм ротора генератора

Результаты химического анализа материала обойм приведены в табл. 1 и 2. По результатам химического анализа состав материала обойм соответствует стали марки 35ХГСЛ (согласно ГОСТ 977–88) и марганцовистому мельхиору МнМц60-20-20 (согласно ТУ 48-0820-379–88).

Таблица 1

Химический состав материала секторов из стали 35ХГСЛ

Обойма	Содержание химических элементов*, % (по массе)								
	C	Si	Mn	Cr	P	S	O	N	Mo
По ГОСТ 977–88	0,30–0,40	0,60–0,80	1,00–1,30	0,60–0,90	≤0,040	≤0,040	–	–	≤0,20
1	0,36	0,78	1,09	0,91	0,019	0,005	0,006	0,006	0,05
2	0,35	0,70	1,10	0,85	0,015	0,010	0,005	0,006	0,01
3	0,37	0,80	1,10	0,92	0,016	0,020	0,004	0,005	0,15

* Fe – основа.

Таблица 2

Химический состав марганцовистого мельхиора МнМц60-20-20

Обойма	Содержание химических элементов*, % (по массе)	
	Mn	Ni
По ТУ 48-0820-379–88	18,0–20,0	18,0–20,0
1	19,1	20,0
2	19,5	19,5
3	19,7	19,9

* Cu – основа.

Металлографическое исследование материала обойм ротора генератора проводили как на травленных, так и нетравленных шлифах. Исследование нетравленных шлифов из стали обойм 1–3 выявило наличие пористости (дефект – типичный для литых материалов) и неметаллических включений. Загрязненность неметаллическими включениями соответствует 2 баллу по ГОСТ 1778–70. Следует отметить, что в нормативной документации регламентировано только содержание строчечных сульфидов. На поверхности нетравленных шлифов из мельхиора обойм 1–3 также обнаружена пористость, типичная для литого материала, и неметаллические включения.

Электронно-зондовым микроанализом установлено, что как в стали, так и в мельхиоре преобладающим типом неметаллических включений являются сульфиды марганца (рис. 4), имеющие округлую форму.

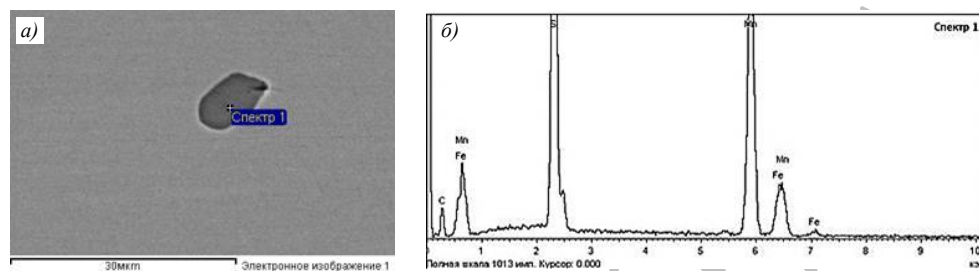


Рис. 4. Неметаллические включения в стали 35ХГСЛ: *а* – участок анализа; *б* – спектр характеристического рентгеновского излучения с включениями

Для выявления микроструктуры мельхиора осуществляли травление образцов реактивом Васильева. Стальные образцы протравливали в 4 %-ном спиртовом растворе HNO_3 . На рис. 5, *а* и *б* приведены фотографии типичной дендритной микроструктуры мельхиора, участок с отслоившимся никелевым покрытием на внутренней поверхности показан стрелками на рис. 5, *в*. Микроструктура стали (высокоотпущенный мартенсит) приведена на рис. 5, *г*.

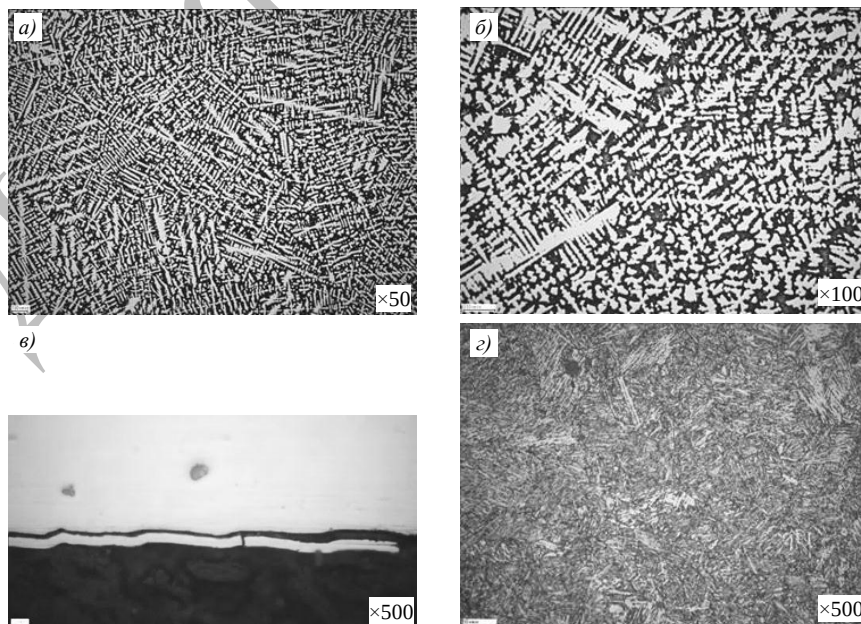


Рис. 5. Типичная микроструктура материала обойм: *а*, *б* – дендритное строение мельхиора; *в* – отслоение никелевого покрытия (показано стрелками); *г* – высокоотпущенный мартенсит стали

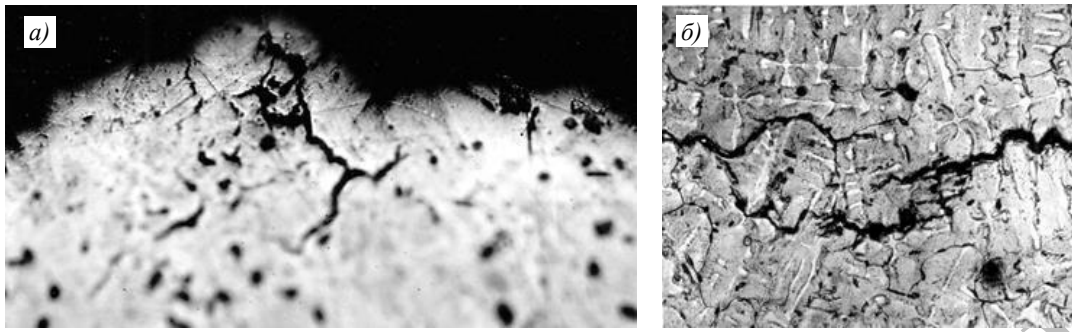


Рис. 6. Развитие трещин по междендритному пространству ($a - \times 300$; $b - \times 300$)

Дополнительно проведено исследование структуры обоймы 3 в зоне образования трещин. На шлифах, изготовленных в перпендикулярном направлении, наблюдается ветвление трещины по междендритному пространству мельхиора (рис. 6).

Фрактографический анализ

С применением электронного сканирующего микроскопа исследованы наружная и внутренняя поверхности обойм роторов генераторов, вскрытые трещины, выявленные в мельхиоровых вставках обоймы 3, и искусственно полученные изломы всех обойм. При исследовании поверхности особое внимание уделялось местам с индикаторными следами.

На наружной поверхности каждой из обойм обнаружены глубокие риски от механической обработки. В местах индикации выявлены коррозионные питтинги размером 50–200 мкм, зачастую развивающиеся по глубоким рискам (рис. 7). На внутренней поверхности в местах индикации выявлено отслоение защитного никелевого покрытия вблизи парных отверстий и развившиеся коррозионные поражения (рис. 8).

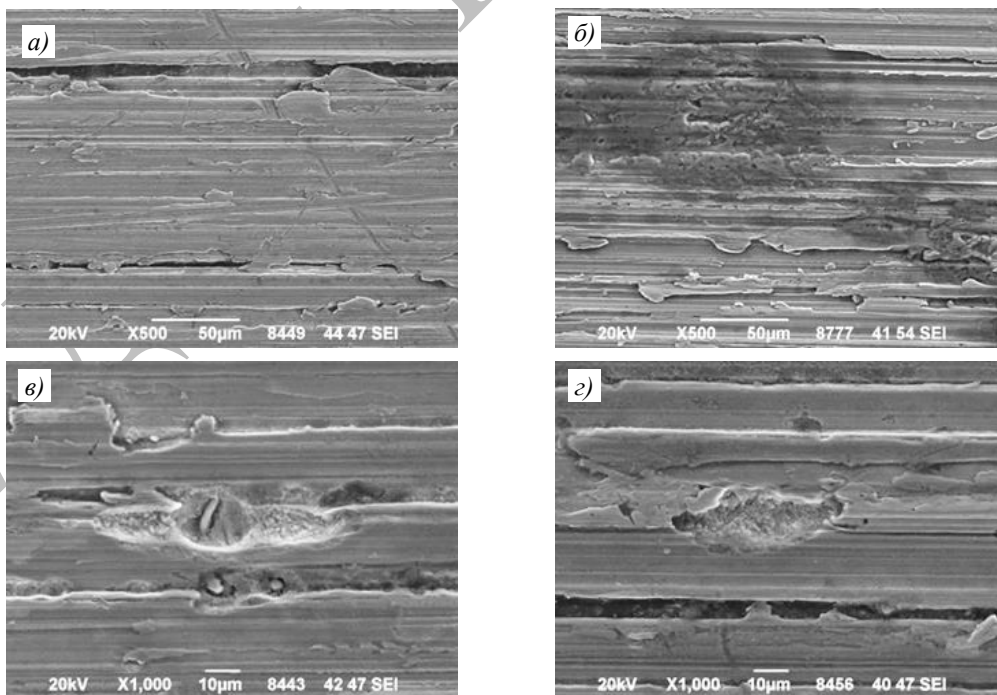


Рис. 7. Типичное состояние наружной поверхности обойм: a, b – грубые риски от механической обработки; c, d – коррозионные питтинги, развивающиеся по рискам

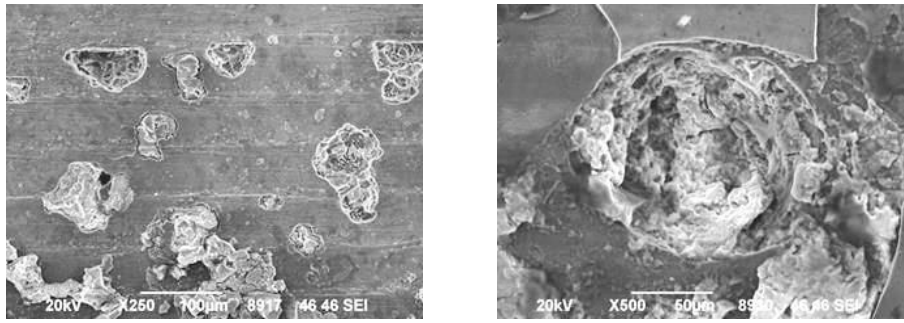


Рис. 8. Типичное состояние внутренней поверхности обойм – коррозионные повреждения поверхности в местах отслоения покрытия

Искусственно полученные изломы фрагментов обойм из стали 35ХГСЛ имеют смешанное строение: разрушение проходит преимущественно по границам зерен, а также по телу и ветвям дендритов. Разрушение по границам зерен хрупкое, в изломе наблюдаются вторичные трещины. В участках внутризеренного разрушения излом имеет мелкоямочный рельеф, наблюдаются фасетки квазиотрыва и рыхлоты (рис. 9). В изломах присутствуют округлые сульфиды марганца – как по границам, так и в теле зерен (рис. 10).

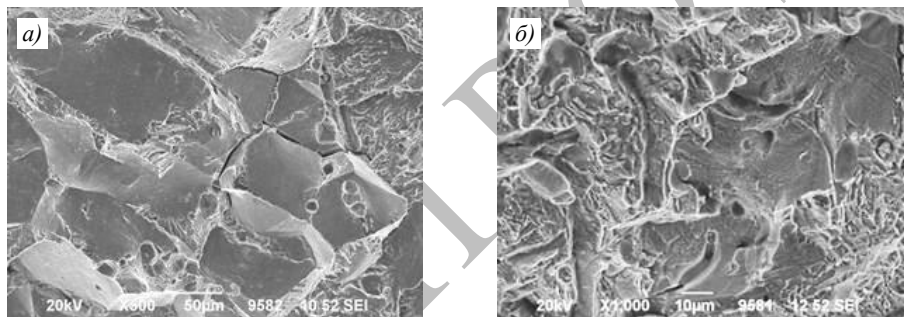


Рис. 9. Типичное строение излома стального фрагмента обоймы: а – разрушение по границам зерен; б – разрушение по телу дендрита

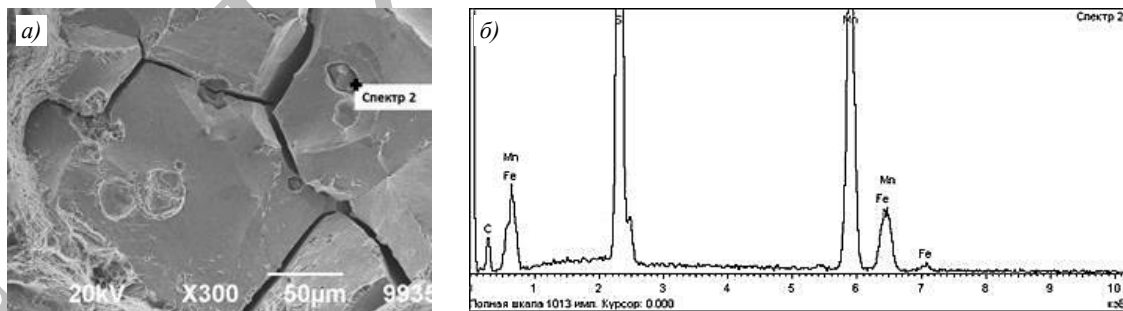


Рис. 10. Частицы в изломах стальных фрагментов обойм: а – частица, отмеченная для проведения электронно-зондового микроанализа; б – спектр характеристического рентгеновского излучения с выделенной частицы

Зона развития эксплуатационных трещин (обойма 3) визуально имеет темно-серый оттенок, зона долома – светло-серая. В изломе наблюдается дендритная структура, вторичные трещины, преобладает хрупкое разрушение по границам дендритов, но присутствуют и участки с ямочным рельефом (рис. 11). Разрушение развивается от участков поверхности с отсутствующим защитным покрытием.

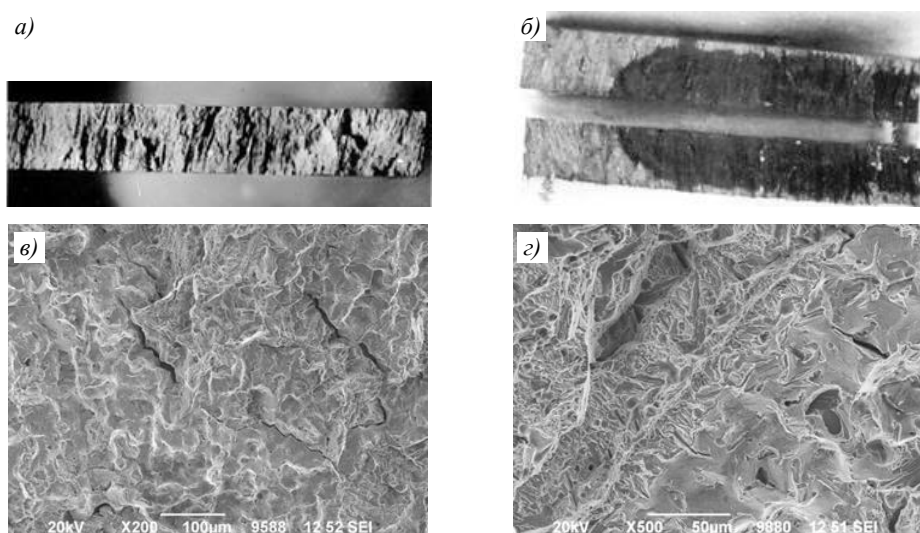


Рис. 11. Строение излома по трещинам, возникшим в процессе эксплуатации: *а* – сквозная эксплуатационная трещина; *б* – вскрытая эксплуатационная трещина; *в*, *г* – типичное строение излома вскрытых трещин

В спектрах характеристического рентгеновского излучения, снятых с границ дендритов, в зоне развития эксплуатационной трещины присутствуют пики серы повышенной интенсивности. В зоне долома наличие серы не выявлено. Общее содержание серы в обойме 3, определенное химическим анализом, не превышает 0,02 % (по массе). На внутренней поверхности обоймы в участках с отсутствующим защитным покрытием также выявлено наличие отложений, содержащих серу, что обусловлено работой детали в серосодержащей среде. Потемнение излома свидетельствует о том, что сера имеет наносной характер, а ее попадание на поверхность излома происходило в ходе развития разрушения. Строение трещины типично для замедленного разрушения (коррозии под напряжением).

Искусственно полученные изломы в обоймах 1 и 2 фрагментов из мельхиора МнМц60-20-20 также имеют характерное для литых сплавов дендритное строение, но разрушение смешанное: проходит преимущественно по телу и частично по ветвям дендритов.

Заключения

В результате комплексного исследования установлено, что по химическому составу, механическим свойствам и микроструктуре обоймы ротора генератора соответствуют требованиям нормативной документации. Образование коррозионных питтингов и трещин в процессе эксплуатации не связано с качеством материала деталей.

На внутренней поверхности обоймы 1, подвергавшейся дополнительному воздействию повышенной температуры и влажности, на участках, не закрытых катушками и клиньями генератора, выявлены отслоения гальванического никелевого покрытия и многочисленные коррозионные питтинги, зачастую развивающиеся по рискам от механической обработки.

На внутренней поверхности обоймы 2, отработавшей суммарно в течение 1494 ч и подвергавшейся дополнительным испытаниям на вращение при 7600 об/мин, выявлены потемнение гальванического никелевого покрытия на участках, не закрытых катушками и клиньями генератора, а также точечные коррозионные питтинги.

Трещины образовались только в обойме 3, подвергавшейся воздействию серосодержащей среды. Образованию и развитию трещин способствовали повреждение и отслоение гальванического никелевого покрытия на внутренней поверхности обоймы –

на участках, не закрытых катушками и клиньями генератора. Излом визуально имеет темно-серый оттенок, преобладает хрупкое разрушение по границам дендритов. Строение трещины типично для замедленного разрушения (коррозии под напряжением). В спектрах характеристического рентгеновского излучения, снятых с границ дендритов в зоне развития эксплуатационной трещины, присутствуют пики серы повышенной интенсивности. Потемнение излома свидетельствует о том, что сера имеет наносной характер, а ее попадание на поверхность излома происходило при развитии разрушения.

В связи с тем, что сталь 35ХГСЛ и мельхиор МнМц60-20-20 не относятся к коррозионностойким материалам, решающим фактором, обеспечивающим длительность эксплуатации обоям ротора генератора в условиях воздействия внешних факторов, является сохранность защитного покрытия на поверхности исследуемых деталей. Анализ результатов исследования показал, что в условиях воздействия внешних факторов гальваническое никелевое покрытие выполняет защитную функцию лишь в течение небольшого отрезка времени. В то же время развитие области разработки и совершенствования защитных покрытий позволяет подбирать составы, которые более стойки к воздействию коррозионно-активной среды и могут существенно увеличить ресурс деталей.

Список источников

1. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. № 5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2022).
2. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСИС, 2007. 259 с.
3. Зечихин Б.С., Журавлев С.В., Мисютин Р.Ю. Авиационные генераторы с постоянными магнитами // Электричество. 2018. № 6. С. 49–59. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-6-49-59.
4. Кузьмичев Р.В., Левин Д.В., Мисютин Р.Ю., Зечихин Б.С. Авиационные генераторы повышенной мощности // Вестник московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 6. С. 39–46.
5. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А., Малова Н.Е. Развитие авиационных лакокрасочных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 5. С. 49–54.
6. Оспенникова О.Г., Козлова А.А., Козлов И.А. Лазерные технологии для удаления лакокрасочных покрытий в процессе ремонта и обслуживания авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-110-123.
7. Гаврилов Г.Н., Каблов Е.Н., Ерофеев В.Т. и др. Материаловедение. Теория и технология термической обработки: учеб. пособие. Саранск: Нац. исслед. Морд. гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2019. 276 с.
8. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
9. Красноярский В.В., Френкель Г.В., Носов Р.П. Коррозия и защита металлов. М.: Metallurgia, 1969. 299 с.
10. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: справочник / под ред. А.А. Герасименко. М.: Машиностроение, 1987. Т. 1. 688 с.
11. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
12. Коврижкина Н.А., Кузнецова В.А., Силаева А.А., Марченко С.А. Способы улучшения свойств лакокрасочных покрытий с помощью введения различных наполнителей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
13. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 11 (71). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.
14. Кузнецова В.А., Деев И.С., Железняк В.Г., Силаева А.А. Износостойкое лакокрасочное покрытие с квазикристаллическим наполнителем // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-68-76.

15. 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.

References

1. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Application of methods of analytical microscopy and X-ray of the structural analysis for research of structural and phase condition of materials. *Trudy VIAM*, 2013, no. 5, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2022).
2. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractodiagnostics of destruction of metallic materials and structures*. Moscow: MISIS, 2007, 259 p.
3. Zechikhin B.S., Zhuravlev S.V., Misyutin R.Yu. Aviation generators with permanent magnets. *Elektrichestvo*, 2018, no. 6, pp. 49–59. DOI: 10.24160/0013-5380-2018-6-49-59.
4. Kuzmichev R.V., Levin D.V., Misyutin R.Yu., Zechikhin B.S. Aviation generators of increased power. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 6, pp. 39–46.
5. Kondrashov E.K., Kuznetsova V.A., Semenova L.V., Lebedeva T.A., Malova N.E. Development of aviation paint and varnish materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2012, no. 5, pp. 49–54.
6. Ospennikova O.G., Kozlova A.A., Kozlov I.A. Laser technology to remove paint coatings in the process of repair and maintenance of aircraft (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-110-123.
7. Gavrilov G.N., Kablov E.N., Erofeev V.T. et al. *Material science. Theory and technology of heat treatment: textbook*. Saransk: Ogarev University, 2019, 276 p.
8. Kablov E.N. Corrosion or life. *Nauka i zhizn*, 2012, no. 11, pp. 16–21.
9. Krasnoyarsky V.V., Frenkel G.V., Nosov R.P. *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 299 p.
10. *Protection against corrosion, aging and biodamage of machines, equipment and structures: reference book*. Ed. A.A. Gerasimenko. Moscow: Mashinostroenie, 1987, vol. 1, 688 p.
11. Zheleznyak V.G. Modern paint and varnish materials for use in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.
12. Kovrizhkina N.A., Kuznetsova V.A., Silaeva A.A., Marchenko S.A. Ways to improve the properties of paint coatings by adding different fillers (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 41–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-41-48.
13. Kuznetsova V.A., Shapovalov G.G. Tendencies of development of the erosion-resistant coatings (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-74-85.
14. Kuznetsova V.A., Deev I.S., Zheleznyak V.G., Silaeva A.A. Anti wear coating with quasicrystal filler. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-68-76.
15. 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.

Информация об авторах

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Левченко Алексей Александрович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Aleksey A. Levchenko, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.03.2022.
 The article was submitted 28.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 30.03.2022.

Научная статья

УДК 536.65

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-123-131

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНТАЛЬПИИ ЭНДО- И ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ДСК-ИССЛЕДОВАНИЯ

Д.В. Селезнев¹, Ю.М. Кожевникова¹, И.А. Белоброва¹, Р.Р. Исхужин¹, В.В. Ташланов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, Россия; vniitf@vniitf.ru

Аннотация. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследован композиционный фазопереходный материал ТАМ-ИГИ-2 (ТУ 752.013–2018). Выявлены закономерности и особенности процессов, протекающих в материале ТАМ-ИГИ-2 при фазовом переходе «плавление–кристаллизация». На примере ДСК-исследования материала ТАМ-ИГИ-2 разработана методика определения параметров, необходимых для построения адекватной математической тепловой модели поведения композиционных фазопереходных материалов.

Ключевые слова: дифференциальная сканирующая калориметрия, композиционный фазопереходный материал, математическая тепловая модель, энтальпия

Для цитирования: Селезнев Д.В., Кожевникова Ю.М., Белоброва И.А., Исхужин Р.Р., Ташланов В.В. Методика определения энтальпии эндо- и экзотермических эффектов на основе ДСК-исследования в композиционных фазопереходных материалах // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-123-131.

Scientific article

METHOD FOR DETERMINING THE ENTHALPY OF ENDO- AND EXOTHERMIC EFFECTS IN COMPOSITE PHASE-CHANGE MATERIALS BASED ON DSC-RESEARCH

D.V. Seleznev¹, Yu.M. Kozhevnikova¹, I.A. Belobrova¹, R.R. Ishuzhin¹, V.V. Tashlanov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia; vniitf@vniitf.ru

Abstract. The composite phase-change material TAM-IGI-2 (TS 752.013–2018) has been studied by the method of differential scanning calorimetry (DSC). Regularities and features of the processes occurring in the TAM-IGI-2 material during the “melting–crystallization” phase change are revealed. Using the example of DSC-research of the TAM-IGI-2 material the method for determining the parameters necessary for designing an adequate mathematical thermal model of the behavior of composite phase change materials has been developed for determining.

Keywords: differential scanning calorimetry, composite phase-change material, mathematical thermal model, enthalpy

For citation: Seleznev D.V., Kozhevnikova Yu.M., Belobrova I.A., Ishuzhin R.R., Tashlanov V.V. Method for determining the enthalpy of endo- and exothermic effects in composite phase-change materials based on DSC-research. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-123-131.

Введение

Одним из наиболее перспективных и динамично развивающихся направлений при разработке пассивных систем обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры в авиационной и ракетно-космической отрасли является применение тепловых аккумуляторов, работа которых основана на использовании теплоаккумулирующих материалов, претерпевающих фазовый переход первого рода «плавление–кристаллизация» [1–6]. Широкое распространение тепловых аккумуляторов для обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры обусловлено тем, что теплоаккумулирующие материалы обладают чрезвычайно высокой плотностью хранения энергии, в отличие от материалов пассивной тепловой защиты, в которых не происходит фазовых превращений [7].

Для проектирования эффективной системы обеспечения теплового режима на основе тепловых аккумуляторов и прогнозирования тепловых режимов защищаемой радиоэлектронной аппаратуры необходимо детальное понимание теплофизических и термодинамических процессов, протекающих в тепловой защите [8, 9]. Наиболее полную качественную и количественную информацию о закономерностях процессов, протекающих в тепловой защите, можно получить посредством математического моделирования, адекватность результатов которого во многом зависит от достоверности данных о свойствах материалов тепловой защиты.

Необходимые для математического моделирования достоверные данные о термодинамических и теплофизических свойствах материалов можно получить при проведении термоаналитического исследования методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Этот метод основан на измерении разности температур между тиглем с образцом материала и пустым тиглем или с эталонным материалом. С помощью ДСК можно количественно определить энтальпию эндотермических и экзотермических эффектов, температурные характеристики пиков реакций и фазовых переходов, измерить удельную теплоемкость материала.

Данная работа посвящена исследованию бескорпусного теплового аккумулятора ТАМ-ИГИ-2 (ТУ 752.013–2018), который представляет собой композиционный фазопереходный материал, состоящий из матрицы (резина), обеспечивающей сохранение формы материала, и теплоаккумулирующего материала (парафин), находящегося в ячейках матрицы.

В настоящее время работы, посвященные изучению теплофизических и термодинамических свойств такого материала, необходимых для корректного математического описания его поведения в условиях тепловых нагрузок, в научно-технической литературе представлены недостаточно широко. В работах [6, 10, 11] интегральные термодинамические характеристики фазового превращения приведены в идеализированном виде, т. е. осуществляется мгновенное фазовое превращение при постоянной температуре. Кроме того, в работе [6] при численном моделировании поведения композиционного фазопереходного материала принято, что всему объему материала соответствует одна расчетная дискретная область. Такое допущение применимо только для определенных случаев – например, когда динамикой фазовых превращений, вызывающей распределение температуры по объему тепловых аккумуляторов, можно пренебречь. Согласно работе [6], это приближение допустимо только при малых плотностях теплового потока от источника энергии, отнесенных к суммарной поверхности контакта соприкосновения объема материала с металлической частью конструкции, т. е. до $3000\text{--}5000\text{ Вт/м}^2$.

Однако при применении системы обеспечения теплового режима на основе композиционного фазопереходного материала в условиях воздействия интенсивного нагрева реализуется температурный градиент по объему теплового аккумулятора, который оказывает значительное влияние на температурный режим защищаемой радиоэлектронной аппаратуры. Помимо низкой теплопроводности матрицы

и термоаккумулирующего материала, кривую плавления, соответствующую идеальному веществу, искажает то, что парафин не является чистым однокомпонентным веществом, а состоит из смеси предельных углеводородов [12]. Поэтому следует отметить, что для корректного моделирования поведения таких материалов в условиях теплового воздействия необходимо учитывать динамику протекания фазовых превращений и обеспечивать достаточную дискретность сеточной модели материала. Особенно это актуально при их использовании в качестве внешней тепловой защиты.

Для установления закономерностей и особенностей процессов, протекающих в композиционном фазопереходном материале ТАМ-ИГИ-2, в данной работе методом ДСК исследованы термодинамические свойства материала в условиях многократного нагрева и охлаждения. На примере ДСК-исследования материала ТАМ-ИГИ-2 разработана методика определения параметров, необходимых для построения адекватной математической тепловой модели композиционных фазопереходных материалов, которая позволяет корректно описывать и прогнозировать поведение таких материалов с учетом динамики протекания фазового превращения «плавление–кристаллизация».

Материалы и методы

Измерение теплового потока, подводимого к образцам из материала ТАМ-ИГИ-2 в динамическом температурном режиме, проводили на дифференциальном сканирующем калориметре с использованием методик ГОСТ Р 55134–2012 [13] и ГОСТ Р 56724–2015 [14]. Разрешение сигнала датчика теплового потока составляло 0,04 мкВт, а погрешность измерения температуры $\pm 0,2$ °С.

Образцы для ДСК-исследования представляли собой диски, вырезанные из пластины материала с использованием просечки, диаметр которых соответствовал диаметру тигля и составлял ~ 4 мм при высоте образцов ~ 2 мм. Масса образцов изменялась от 20 до 24 мг. В качестве эталонного образца в исследованиях использовали пустой тигель.

Взвешивание отдельно пустых тиглей и тиглей с образцами проводили на лабораторных весах MS 204S с ценой деления 0,01 мг.

В экспериментах рабочий цикл ДСК-исследований материала состоял из двух последовательных стадий нагрева и охлаждения. Последовательность рабочего цикла имела следующий режим: «нагрев–охлаждение–нагрев–охлаждение», при этом условия проведения каждой стадии следующие:

- начальная температура -20 °С;
- конечная температура $+100$ °С;
- скорости нагрева и охлаждения: 2,5; 5 и 10 °С/мин;
- количество образцов – по 3 образца на каждый рабочий цикл исследований (образцы вырезали из разных участков пластины материала).

Обработка результатов ДСК-исследований направлена на получение значений удельной энтальпии материала. Энтальпийный подход к математическому моделированию поведения материала исключает неопределенность, связанную с законом построения базовой линии, и позволяет более достоверно учесть динамику процесса фазового превращения с учетом изменения собственной теплоемкости матрицы и наполнителя во время его протекания. Кроме того, энтальпия в условиях фазовых переходов изменяется без резких скачков, характерных для удельной теплоемкости, что обеспечивает более устойчивое численное решение и его быстрое схождение с требуемой точностью.

Определение значений энтальпии основывается на первом начале термодинамики при изобарном процессе для конденсированных сред, механическим взаимодействием которых с окружающей средой можно пренебречь [15]:

$$\delta Q = dH, \quad (1)$$

где dH – изменение энтальпии системы; δQ – элементарное количество теплоты, которым система обменивается с окружающей средой.

Исходя из вышесказанного, определение удельной энтальпии материала до, после и во время протекания фазового перехода осуществлялось с использованием зависимости удельного теплового потока (количества тепла, подведенного к материалу в единицу времени) от температуры $\Phi(T)$ и времени $\Phi(\tau)$, непосредственно полученной из ДСК-исследований (рис. 1), с помощью выражения

$$h(\tau) = \int_{\tau_0}^{\tau} \Phi(\tau) \cdot d\tau, \quad (2)$$

где τ_0 – начальное время, с; τ – конечное время, с.

По результатам ДСК-исследований обнаружено, что фазовый переход происходит в широком температурном диапазоне, в котором функции $\Phi(T)$ и $\Phi(\tau)$ являются непрерывными и дифференцируемыми, а выражение (2) справедливо для всего температурного диапазона ДСК-исследований (до, после и во время фазового перехода).

Зависимость $h(T)$, приведенную на рис. 2, определяли на основе результатов ДСК-исследований (рис. 1) путем сопоставления зависимостей $h(\tau)$ и $T(\tau)$.

Важным обстоятельством при проведении ДСК-исследований является обеспечение температурного диапазона, который позволяет получать прямолинейные участки на некотором характерном участке ДСК-кривой до и после фазового перехода. Протяженность характерного участка должна быть такой, чтобы, с одной стороны, исключалось влияние участка, когда измерительная система выходит на регулярный режим, с другой – гарантированно исключалось влияние фазового превращения.

Кроме определения температурных границ фазового перехода, прямолинейные участки на ДСК-кривой способствуют получению корректных значений удельной энтальпии материала до и после фазового перехода.

Определение значений тепловых эффектов плавления и кристаллизации, температурных границ фазовых переходов осуществляли с использованием специального программного обеспечения, интегрированного в исследовательскую установку, с помощью которого построена на основе левой и правой касательных тангенциальная базовая линия типа Spline. Определенные с использованием компьютерной программы площади, заключенные между ДСК-кривыми и базовой линией Spline, и пересечения, образованные ДСК-кривыми и базовой линией Spline, соответствуют значениям теплового эффекта плавления и кристаллизации и температурным границам фазовых переходов.

Результаты и обсуждение

В результате исследования получены зависимости удельного теплового потока от температуры и времени. Вследствие технологических особенностей исследовательской установки процесс второго охлаждения не был доведен до полной кристаллизации наполнителя. Однако основная часть ДСК-кривой была получена, результаты ее обработки позволяют проводить корректный анализ поведения материала.

Как показал анализ результатов исследований, ДСК-кривые, соответствующие образцам 1, 2 и 3, практически совпадают, что свидетельствует о стабильности теплофизических и термодинамических свойств материала и равномерном распределении наполнителя по матрице материала. На основании анализа результатов исследований для различных скоростей нагрева и охлаждения материала в качестве характерных ДСК-кривых принималось среднее значение, полученное при обработке ДСК-кривых трех образцов материала.

На рис. 1 приведены ДСК-кривые материала ТАМ-ИГИ-2 при различных скоростях нагрева и охлаждения.

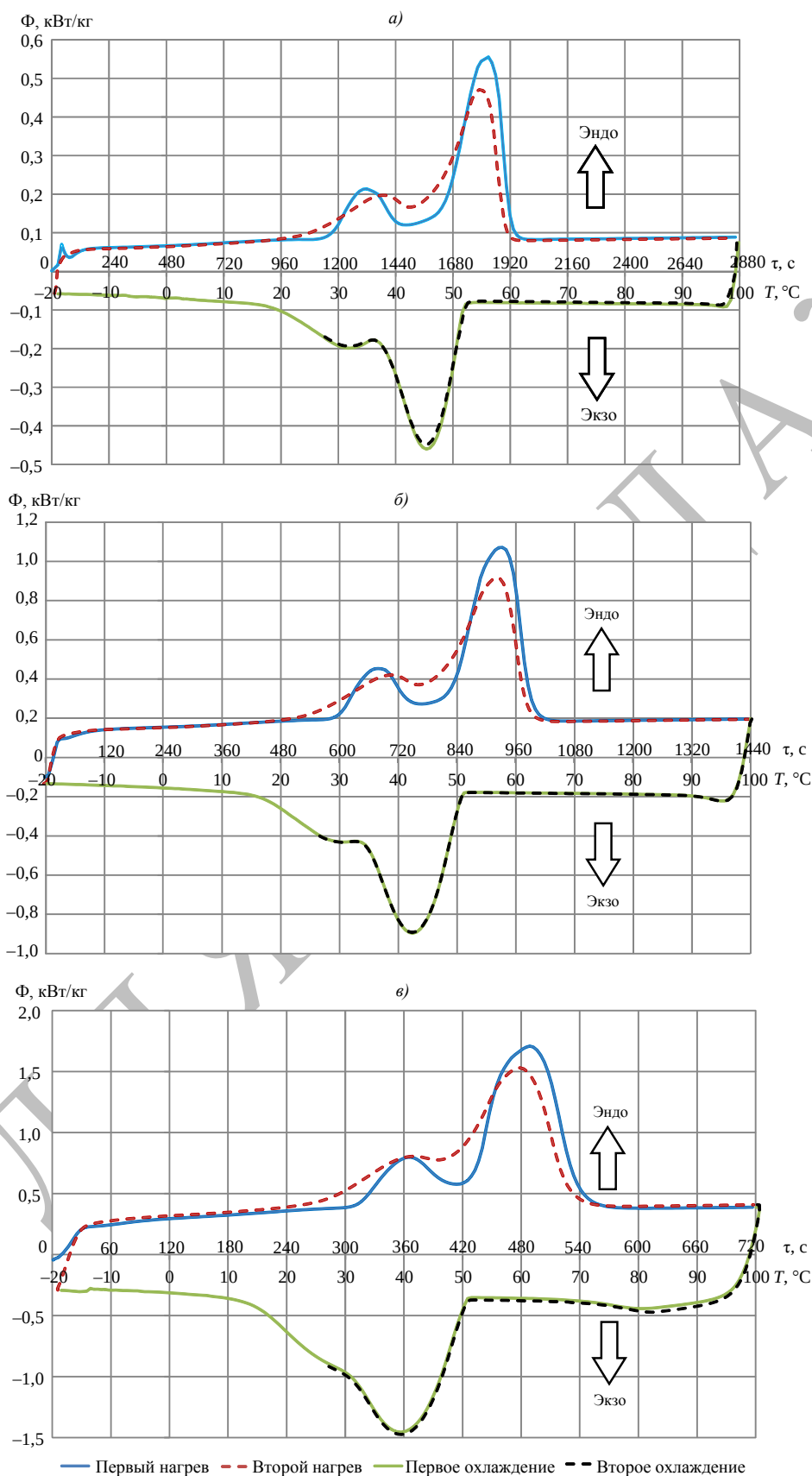


Рис. 1. ДСК-кривые образца материала ТАМ-ИГИ-2 при скорости нагрева и охлаждения 2,5 (а), 5 (б) и 10 °С/мин (в)

По результатам исследования обнаружено, что эндо- и экзотермические эффекты плавления и кристаллизации наполнителя происходят в широком диапазоне температур с двумя явно выраженными пиками (рис. 1). После окончания первого пика ДСК-кривая не выходит на прежний уровень, что может быть вызвано многокомпонентностью наполнителя. В работе [16] такое поведение ДСК-кривой связывают с наложением тепловых эффектов, когда при нагревании смеси завершение плавления низкотемпературного компонента происходит на фоне начавшегося плавления более высокотемпературного компонента.

Значения удельной теплоты кристаллизации материала, соответствующие первому и второму охлаждению, и удельной теплоты плавления материала, соответствующие второму нагреву, совпадают для каждой из скоростей нагрева и охлаждения (см. таблицу). Таким образом, после проведения первого нагрева термодинамические характеристики фазового превращения стабилизируются. По-видимому, это связано с самоочисткой компонентов наполнителя в результате первого плавления [16, 17].

Процесс кристаллизации наполнителя в материале начинается после переохлаждения и происходит в более узком температурном диапазоне, чем процесс плавления (второй нагрев), в то же время величины тепловых эффектов плавления и кристаллизации совпадают (см. таблицу).

С увеличением скорости изменения температуры исследований температура, соответствующая максимальной скорости протекания фазового перехода, смещается в случае нагрева в сторону более высоких температур, а в случае охлаждения – в сторону более низких температур. Температурный диапазон фазового перехода расширяется с увеличением скорости изменения температуры исследований за счет смещения температуры окончания фазового перехода при нагреве в сторону более высоких температур, при охлаждении – в сторону более низких температур. При этом температура начала фазового перехода остается практически одинаковой независимо от скорости изменения температуры исследований (см. таблицу).

Значения характеристик фазовых превращений образцов материала ТАМ-ИГИ-2 при различных скоростях нагрева и охлаждения

Стадия исследований	Характеристики фазовых переходов	Значения характеристик при скорости изменения температуры, °С/мин		
		2,5	5	10
Первый нагрев	$t_n - t_k$, °С	29–61	30–64	31–71
	$t_{\max}$, °С	55	58	61
	$r_{\text{пл}}$, кДж/кг	122	132	134
Второй нагрев	$t_n - t_k$, °С	23–59	23–62	23–69
	$t_{\max}$, °С	55	57	60
	$r_{\text{пл}}$, кДж/кг	114	126	128
Первое охлаждение = второе охлаждение	$t_n - t_k$, °С	52–20	51–18	51–15
	$t_{\max}$, °С	45	42	40
	$r_{\text{кр}}$, кДж/кг	114	125	128

Примечание. t_n – температура начала фазового перехода; t_k – температура окончания фазового перехода; $t_{\max}$ – температура, соответствующая максимальной скорости фазового перехода; $r_{\text{пл}}$ – скрытая теплота плавления (энтальпия эндотермического эффекта); $r_{\text{кр}}$ – скрытая теплота кристаллизации (энтальпия экзотермического эффекта).

В таблице представлены значения характеристик фазовых превращений образцов материала ТАМ-ИГИ-2, определенные при скоростях нагрева и охлаждения 2,5; 5 и 10 °С/мин в температурном интервале от –20 до +100 °С методом ДСК. Приведены значения только для первого охлаждения, так как ДСК-кривые первого и второго охлаждения полностью совпадают.

Из проведенного анализа, сопоставления и обобщения экспериментальных данных следует что, весь объем материала ТАМ-ИГИ-2, который участвует в тепловой

защите, нельзя рассматривать как один элементарный объем в расчетной схеме, предполагающий одинаковую температуру во всем материале, так как имеет место широкий температурный интервал фазовых превращений, который обусловлен низкой температуропроводностью материала и многокомпонентностью наполнителя. Наиболее приближенными к достоверным свойствам материала являются свойства, полученные в результате исследований, в которых реализуется максимально равномерный прогрев материала. В данной работе таким исследованиям материала соответствуют ДСК-исследования при скорости нагрева и охлаждения $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Переохлаждение характеризует наличие температурного гистерезиса в материале, возникающего при процессах плавления и кристаллизации, из чего следует, что для математического описания процессов охлаждения и нагрева материала необходимо использовать разные зависимости удельной энтальпии материала от температуры. На рис. 2 представлена петля температурного гистерезиса, образованная зависимостями удельной энтальпии материала от температуры для процессов нагрева и охлаждения. Направление процесса показано на рисунке стрелками.

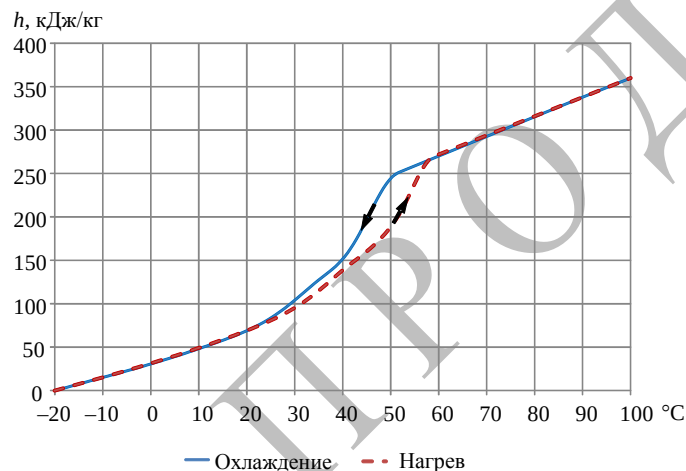


Рис. 2. Зависимости удельной энтальпии материала от температуры для процессов нагрева и охлаждения

Преобразование ДСК-кривых в зависимости удельной энтальпии материала от температуры осуществлялось на основе выражения (2).

Заключения

По результатам проведенных ДСК-исследований выявлены закономерности и особенности процессов, протекающих в материале ТАМ-ИГИ-2 при фазовых превращениях «плавление–кристаллизация» в условиях многократного нагрева и охлаждения.

Обнаружено, что фазовые превращения протекают в широком температурном диапазоне: после первого нагрева материала ТАМ-ИГИ-2 его термодинамические свойства стабилизируются, присутствует эффект переохлаждения, процесс кристаллизации происходит более интенсивно относительно плавления.

Таким образом, на примере исследования материала ТАМ-ИГИ-2 разработана методика определения параметров, необходимых для построения адекватной математической тепловой модели поведения композиционных фазопереходных материалов, основанная на анализе полученных в результате ДСК-исследований данных о термодинамических свойствах материалов с учетом обнаруженных особенностей протекания фазовых превращений. Математическое моделирование поведения композиционных фазопереходных материалов с учетом полученных результатов позволяет проектировать эффективную систему обеспечения теплового режима оптимальной конструкции и корректно прогнозировать температурные режимы защищаемой радиоэлектронной аппаратуры.

Список источников

1. Arshad A., Ali H.M., Ali M., Manzoor S. Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: effect of pin thickness and PCM volume fraction // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 112. P. 143–155.
2. Лелюшкин Н.В., Мишин Г.С. Перспективы применения тепловых аккумуляторов в системах обеспечения теплового режима малых космических аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. 2019. № 6 (111). С. 101–109.
3. Васильев Е.Н., Деревянко В.А., Корхова М.И. Экспериментальное исследование динамики фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования радиоэлектронной аппаратуры // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26. № 6. С. 969–976.
4. Jackson G.R., Fisher T.S. Response of porous foams filled with phase change material under transient heating conditions // *AIAA Aviation*. 2016. No. 45. P. 1–13. DOI: 10.2514/6.2015-2811.
5. Choi M.K. Paraffin Phase Change Material for Maintaining Temperature Stability of IceCube Type of CubeSats in LEO // *AIAA Propulsion and Energy Forum*. 2017. No. 13. P. 1–22. DOI: 10.2514/6.2015-3984.
6. Алексеев В.А., Карабин А.Е. Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // *Труды МАИ*. 2011. № 49. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy> (дата обращения: 10.12.2021).
7. Аймбетова И.О., Сулейменов У.С., Хадзарагова Е.А., Алкацев М.И. Исследование теплофизических и эксплуатационных свойств теплоаккумулирующих материалов на основе парафинов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 11-1. С. 6–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-6-17.
8. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979. 208 с.
9. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
10. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52. № 5. С. 760–776. DOI: 10.7868/S0040364414050019.
11. Исаев А.Ю. Материалы, применяемые в качестве теплозащитных и теплоизоляционных // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2013. № 4. С. 10–15.
12. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М.: Энергия, 1975. 88 с.
13. ГОСТ Р 55134–2012. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.
14. ГОСТ Р 56724–2015. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 3. Определение температуры и энтальпии плавления и кристаллизации. М.: Стандартинформ, 2016. 6 с.
15. Исаев С.И. Термодинамика: учеб. для вузов. 3-е., перераб. и доп. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 416 с.
16. Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф., Коринчевская Т.В., Парняков А.С., Постников В.А. Теплофизические свойства композиционных теплоаккумулирующих материалов на основе органических соединений // *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33. № 5. С. 96–103.
17. Котельникова Е.Н. Кристаллохимия парафинов. Методы исследования, результаты, поведение в природе. СПб.: Журнал Нева, 2002. 343 с.

References

1. Arshad A., Ali H.M., Ali M., Manzoor S. Thermal performance of phase change material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: effect of pin thickness and PCM volume fraction. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 112, pp. 143–155.
2. Lelyushkin N.V., Mishin G.S. Prospects for the use of thermal accumulators in systems for ensuring the thermal regime of small spacecraft. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2019, no. 6 (111), pp. 101–109.
3. Vasiliev E.N., Derevianko V.A., Korkhova M.I. Experimental study of the dynamics of phase transformations in a heat accumulator of a thermal control system for radio electronic equipment. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2019, vol. 26, no. 6, pp. 969–976.

4. Jackson G.R., Fisher T.S. Response of porous foams filled with phase change material under transient heating conditions. *AIAA Aviation*, 2016, no. 45, pp. 1–13. DOI: 10.2514/6.2015-2811.
5. Choi M.K. Paraffin Phase Change Material for Maintaining Temperature Stability of Ice Cube Type of CubeSats in LEO. *AIAA Propulsion and Energy Forum*, 2017, no. 13, pp. 1–22. DOI: 10.2514/6.2015-3984.
6. Alekseev V.A., Karabin A.E. A new type of heat accumulators for cooling the radio-electronic equipment of spacecraft. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy> (accesses: December 10, 2021).
7. Aimbetova I.O., Suleimenov U.S., Khadzaragova E.A., Alkatsev M.I. Study of thermophysical and operational properties of heat storage materials based on paraffins. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2020, no. 11-1. pp. 6–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-6-17.
8. Zaletaev V.M., Kapinos Yu.V., Surguchev O.V. *Calculation of heat transfer of the spacecraft*. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 208 p.
9. Dulnev G.N., Semyashkin E.M. *Heat transfer in radio electronic devices*. Leningrad: Energiya, 1968, 360 p.
10. Babaev B.D. Principles of thermal storage and used heat storage materials. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 760–776. DOI: 10.7868/S0040364414050019.
11. Isaev A.Yu. Materials used as heat-shielding and heat-insulating. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2013, no. 4, pp. 10–15.
12. Alekseev V.A. *Cooling of radio-electronic equipment using melting substances*. Moscow: Energiya, 1975. 88 p.
13. State Standard R 55134–2012. *Plastics. Differential Scanning Calorimetry (DSC). Part 1. General principles*. Moscow: Standartinform, 2014, 23 p.
14. State Standard R 56724–2015. *Plastics. Differential Scanning Calorimetry (DSC). Part 3. Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization*. Moscow: Standartinform, 2016, 6 p.
15. Isaev S.I. *Thermodynamics: textbook for universities*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2000, 416 p.
16. Mikhailik V.A., Snezhkin Yu.F., Korinchevskaya T.V., Parnyakov A.S., Postnikov V.A. Thermophysical properties of composite heat storage materials based on organic compounds. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, vol. 33, no. 5, pp. 96–103.
17. Kotelnikova E.N. *Crystal chemistry of paraffins. Research methods, results, behavior in nature*. St. Petersburg: Journal Neva, 2002, 343 p.

Информация об авторах

Селезнев Дмитрий Владимирович, научный сотрудник, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», vniitf@vniitf.ru
Кожевникова Юлия Михайловна, младший научный сотрудник, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», vniitf@vniitf.ru
Белоброва Ирина Андреевна, начальник группы, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», vniitf@vniitf.ru
Исхужин Ринат Робертович, начальник отдела, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», vniitf@vniitf.ru
Ташланов Владимир Валерьевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», vniitf@vniitf.ru

Information about the authors

Dmitry V. Seleznev, Researcher, FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», vniitf@vniitf.ru
Yulia M. Kozhevnikova, Junior Researcher, FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», vniitf@vniitf.ru
Irina A. Belobrova, Head of group, FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», vniitf@vniitf.ru
Rinat R. Ishuzhin, Head of Division, FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», vniitf@vniitf.ru
Vladimir V. Tashlanov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», vniitf@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 19.04.2022; получена после доработки 04.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.07.2022.
 The article was submitted 19.04.2022; received in revised form 04.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 20.07.2022.

Научная статья

УДК 004.021

DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-132-146

АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (обзор)***Часть 2. Метрики машинного обучения. Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев. Алгоритм нейронной сети по прогнозированию свойств ферритно-мартенситной стали***Е.И. Орешко¹, В.С. Ерасов¹, И.Г. Сибяев¹, А.Н. Луценко¹, П.В. Шершак¹*

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

Аннотация. Для решения материаловедческих задач прогнозирования свойств материала при варьировании его состава и разнообразного внешнего воздействия с использованием нейросетевого программирования рассмотрены основные алгоритмы машинного обучения: метод ближайших соседей, решающее дерево, решающий лес, градиентный бустинг, искусственные нейронные сети. Показаны особенности применения в нейросетях решающих деревьев и их ансамблей в задачах классификации и регрессии. Рассмотрены основные архитектуры и алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей. Описаны особенности использования некоторых метрик машинного обучения: Accuracy, Precision, Recall, F1-мера, ROC-AUC, MSE, MAE, MAPE, R^2 – для решения материаловедческих задач. Представлен алгоритм построения искусственной нейронной сети по прогнозированию предела текучести и размеров структуры от химического состава ферритно-мартенситной стали.

Ключевые слова: прогнозирование свойств материала, зависимость «состав–свойство», машинное обучение, нейронная сеть, сигмоидальная функция, решающие деревья, аппроксимация, расчет, напряжения, деформация

Для цитирования: Орешко Е.И., Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Луценко А.Н., Шершак П.В. Алгоритмы машинного обучения (обзор). Часть 2. Метрики машинного обучения. Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев. Алгоритм нейронной сети по прогнозированию свойств ферритно-мартенситной стали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-132-146.

Scientific article

MACHINE LEARNING ALGORITHMS (review)**Part 2. Machine learning metrics. Decision trees and ensembles of decision trees. An algorithm for neural network to forecast properties of ferrite-martensite steel***E.I. Oreshko¹, V.S. Erasov¹, I.G. Sibayev¹, A.N. Lutsenko¹, P.V. Shershak¹*

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 review were analyzed key machine learning algorithms for solution of material science tasks, which include predicting properties of materials by varying its composition and means of external impact using neural network programming. These algorithms include: the nearest neighbor method, decision tree, decision forest, gradient boosting, artificial neural networks. The features of the use of decision trees and their ensembles in classification

* Часть 1 – см. «Авиационные материалы и технологии», № 3 (68), 2022.

and regression problems are shown. The basic architectures and learning algorithms of artificial neural networks are considered. The features of using some machine learning metrics are described: Accuracy, Precision, Recall, F1-measure, ROC-AUC, MSE, MAE, MARE, R2. An algorithm for neural network to forecast yield limit and structure sizes of ferrite martensite steel is presented.

Keywords: material property forecasting, «composition–property» dependence, machine learning, neural network, sigmoidal function, decision trees, approximation, calculation, stresses, deformation

For citation: Oreshko E.I., Erasov V.S., Sibayev I.G., Lutsenko A.N., Shershak P.V. Machine learning algorithms (review). Part 2. Machine learning metrics. Decision trees and ensembles of decision trees. An algorithm for neural network to forecast properties of ferrite-martensite steel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 12. Available at: <http://www.jornal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-132-146.

Введение

Современные достижения материаловедения в создании новых материалов с уникальными свойствами на современном этапе уже не могут обходиться без оптимизации состава (например, легирующих элементов в металлических сплавах) и прогнозирования изменения свойств металлов и композитов при воздействии внешних воздействующих факторов. При достаточно большом количестве и длительности внешнего воздействия, значительном числе составляющих материал ингредиентов невозможно без использования специализированного программного обеспечения найти оптимальное сочетание компонентов материала и определить сроки эксплуатации материала в составе изделия и ресурс всего технического изделия. Создание систем машинного обучения является в настоящее время одной из самых востребованных, современных и актуальных методик расчетной оптимизации задач при поиске оптимальных решений.

Кроме методов, моделей и технологий, традиционно используемых для решения сложных, трудно формализуемых, интеллектуальных задач (например, имитационного моделирования [1], кластеризации [2]), также ведутся интенсивные исследования в области разработки интеллектуальных информационных технологий, к которым в первую очередь относятся нейросетевые технологии.

Особенно важным в этих исследованиях является изучение и использование на практике новых подходов и методов для решения сложных задач подбора состава, прогнозирования свойств, информационного мониторинга, автоматизированного проектирования [3], эволюционного моделирования [4], различных гибридных технологий (нейронечетких, нейрогенетических) и др.

Методы машинного обучения применяют в самых различных областях – например, в материаловедении при создании новых материалов [5–12], в том числе для прогнозирования прочностных и деформационных характеристик материалов в зависимости от их структуры, технологии изготовления и условий эксплуатации.

Цель данной работы – описание применимых для решения материаловедческих задач алгоритмов машинного обучения.

Метрики машинного обучения

Метрика – это показатель качества работы алгоритма для данной задачи, который тем больше, чем точнее алгоритм предсказывает правильные ответы. Подбор таких метрик зависит от цели расчета модели.

Доля правильно предсказанных ответов алгоритма к общему количеству объектов в выборке измеряется с помощью величины *accuracy* (процент правильных ответов) [13], которая является одной из метрик в задачах классификации.

Рассмотрим метрики в задачах классификации на примере задачи поиска бракованной продукции. В задаче два класса – бракованная продукция (1) и нормальная продукция (0). Изобразим все операции в строках (рис. 1).

Верные ответы	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Беспечный алгоритм	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Неплохой алгоритм	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

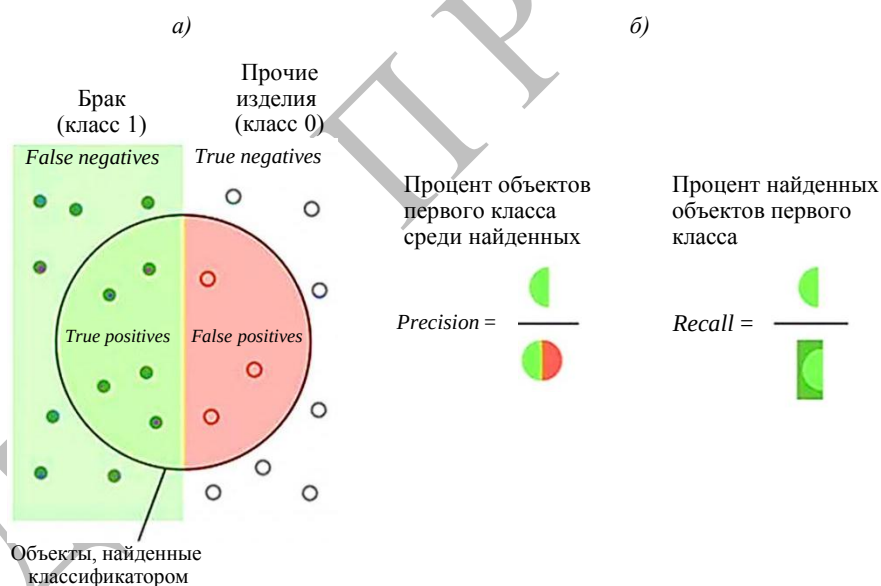
accuracy: 0,9

accuracy: 0,8

Рис. 1. Метрики в задаче классификации [14]

Условно предположим, что 10 % всех технологических операций приводят к получению бракованной продукции. Пусть есть условно «беспечный» алгоритм, который все операции воспринимает как обычные. Тогда значение *accuracy* будет равно 0,9, но алгоритм в таком случае будет абсолютно бесполезен. Алгоритм, который отбраковывает 30 % продукции, в том числе бракованную, будет больше отвечать поставленной цели, но при этом значение метрики у него меньше и равно 80 %. Таким образом, одной метрики *accuracy* может быть недостаточно для решения некоторых задач.

Рассмотрим пример на рис. 2, а. Вся совокупность объектов разделена на две части: слева – объекты класса 1 (брак), справа – класса 0 (прочие изделия).

Рис. 2. Результат работы классификатора (а) и оценка его метриками *Precision* и *Recall* (б) [14]

Построим некоторый классификатор и результат его работы визуализируем круговой областью. Внутри области попали объекты, которые классификатор отнес к первому классу, а во вне – объекты нулевого класса. У идеального классификатора эта область должна совпадать с левой частью начального разбиения. Видно, что плоскость разделена на четыре части. Левая половина круга – это объекты, которые будем называть *true* (поскольку алгоритм на них не ошибается) *positive* (поскольку ответ алгоритма положительный). Правая половина круга – это *false positive* (поскольку алгоритм ошибся), тогда левая половина вне круга – это *false negative*, а правая половина вне круга – это *true negative*.

Рассмотрим первую метрику – это *Precision* (точность). Она равна проценту первого класса среди тех, которые алгоритм отнес к первому классу, т. е. это столько процентов из тех операций, которые привели к браку. Чем больше эта метрика, тем меньше честных операций заблокируется, что является положительным фактором. Таким образом, *Precision* определяется как отношение *true positive* к *true positive + false positive* (рис. 2, б).

Следующая важная метрика – *Recall* (полнота), которая равна проценту первого класса среди всех объектов первого класса, т. е. столько процентов операций, приводящих к браку, найдено. Полнота – это важнейшая метрика именно для этой задачи. Чем она больше, тем меньше брака пропущено. Таким образом, *Recall* определяется как отношение *true positive* к *true positive + false negative* (рис. 2, б).

Часто при поиске оптимального алгоритма фиксируют порог (ниже которого не нужно опускаться) по одной из двух метрик и оптимизируют вторую метрику. Иногда используют комбинацию этих двух метрик, которая называется *F1-мера*, которая вычисляется по формуле

$$F1 = \frac{2Precision \ Recall}{Precision + Recall} \quad (1)$$

Следующая метрика задачи классификации имеет аббревиатуру ROC-AUC (*Receiver Operator Characteristic*).

В отличие от предыдущих метрик метрика ROC-AUC работает не с предсказанными ответами классов, а с предсказанными вероятностями классов.

Рассмотрим алгоритм логистической регрессии для каждого объекта, который предсказал вероятность того, что объект относится к классу 1. На рис. 3 показан график, который описывает качество работы алгоритма ROC-AUC для решаемой задачи (рис. 4, а).

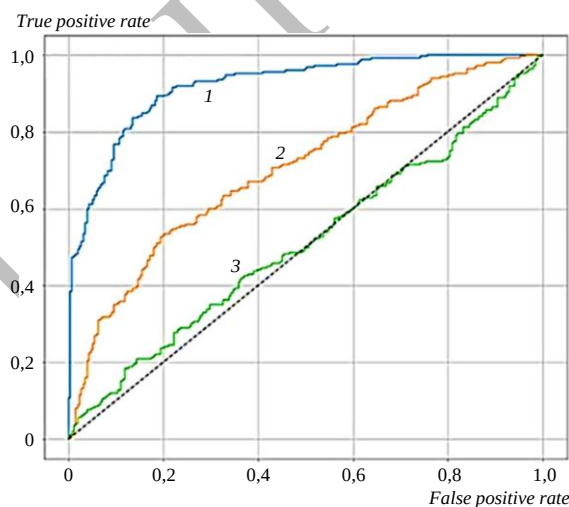


Рис. 3. График, описывающий качество работы алгоритма с помощью метрики ROC-AUC [14]: 1 – хорошее решение; 2 – неплохое решение; 3 – плохое решение

Из точки с координатами (0; 0) надо прийти в точку с координатами (1; 1). Всего есть четыре объекта класса 1, поэтому ось ординат разбиваем на четыре части (рис. 4, б и в), также есть всего шесть объектов класса 0, поэтому ось абсцисс разбиваем на шесть частей.

Если идти по выборке сверху вниз (рис. 4, а), то при значении класса 1 график поднимается на одно деление вверх, при значении класса 0 график смещается на одно деление вправо.

Полученная кривая в координатах «*true positive–false positive*», проходящая из точки с координатами (0; 0) в точку с координатами (1; 1), показана на рис. 4, б. Например, выделенная точка соответствует вероятности $P = 0,6$ и имеет координаты (1/6; 3/4). Это означает, что при отнесении объектов с вероятностью более 0,6 к классу 1, а объектов ниже этого порога к классу 0 доля *true positive* к общему количеству объектов первого класса равна 3/4, а доля *false positive* к общему количеству объектов первого класса будет равна 1/6.

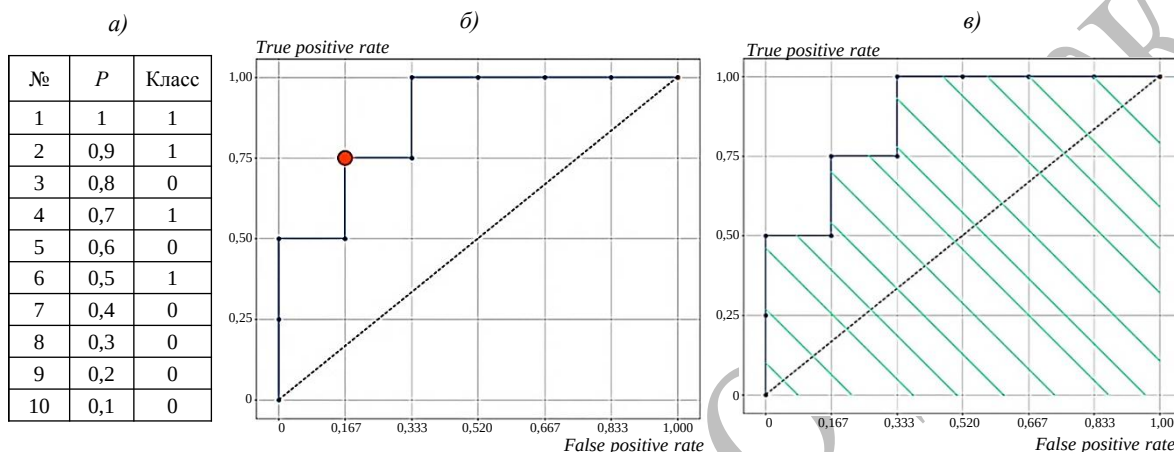


Рис. 4. Пример использования ROC-кривой [14]: а – вероятность отнесения объектов к классам 1 и 0; б – график зависимости в координатах «*true positive–false positive*»; в – определение метрики как площади фигуры под графиком

Теперь возможно определить метрику ROC-AUC, которая равна отношению площади фигуры под ROC-кривой к общей площади графика (рис. 4, б и в) – для рассматриваемой кривой она равна 0,875.

Когда все объекты первого класса имеют большую вероятность, а все объекты нулевого класса – маленькую, метрика будет равна 1. На рис. 3 три разные ROC-кривые построены для одной и той же задачи классификации. Первая кривая соответствует хорошему решению – метрика ROC-AUC близка к 1. Вторая кривая соответствует неплохому решению – метрика ROC-AUC порядка 0,7, кривая все еще имеет выпуклость вверх. Третья кривая проходит близко к диагонали – метрика ROC-AUC равна 0,5. Это кривая случайного алгоритма, который не «обращает внимания» на признаки и перемешивает объекты между собой. Такая модель не нашла в представленных данных никаких закономерностей. На значение метрики ROC-AUC не влияет дисбаланс классов (в отличие, например, от метрики *accuracy*), что делает ее одной из самых популярных метрик на практике.

Рассмотрим метрики в задаче регрессии. Две самые распространенные метрики в задаче регрессии это MSE (*mean squared error*) и MAE (*mean absolute error*). Они вычисляются по следующим формулам:

$$\text{MSE}(y_{\text{true}}, y_{\text{pred}}) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (y_{\text{true}}^i - y_{\text{pred}}^i)^2, \quad (2)$$

$$\text{MAE}(y_{\text{true}}, y_{\text{pred}}) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l |y_{\text{true}}^i - y_{\text{pred}}^i|. \quad (3)$$

Среднеквадратичная ошибка MSE – среднее значение квадрата отклонения от правильного ответа. Средняя абсолютная ошибка MAE – среднее значение модуля отклонения от правильного ответа.

Используют также метрику RMSE (*rooted mean squared error*), равную корню квадратному из MSE, и метрику MAPE (*mean absolute percentage error*), которая вычисляется по формуле

$$\text{MAPE}(y_{\text{true}}, y_{\text{pred}}) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l \left(\frac{y_{\text{true}}^i - y_{\text{pred}}^i}{y_{\text{true}}^i} \right)^2. \quad (4)$$

Метрика MAPE привлекательна тем, что дает возможность измерять среднее значение ошибки в процентах от реального значения целевой переменной.

Метрика R^2 (произносится как *R-квадрат*) или коэффициент детерминации (мера определенности) определяет качество полученной регрессионной прямой. Это качество выражается степенью соответствия между исходными данными и регрессионной моделью (расчетными данными). Мера определенности всегда находится в пределах интервала $[0; 1]$, которая вычисляется по формуле

$$R_2(y_{\text{true}}, y_{\text{pred}}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l (y_{\text{true}}^i - y_{\text{pred}}^i)^2}{\sum_{i=1}^l (y_{\text{true}}^i - \overline{y_{\text{true}}})^2}, \quad (5)$$

где $\overline{y_{\text{true}}}$ – среднее истинное значение целевой переменной. (Здесь в числителе стоит MSE, умноженное на l , а в знаменателе – выборочная дисперсия выборки y_{true} , также умноженная на l .)

Если считать параметр y_{true} тождественно равным среднему значению целевой переменной $\overline{y_{\text{true}}}$, то R^2 становится равным 0. Из этого следует, что постоянная модель машинного обучения, которая предсказывает среднее значение целевой переменной независимо от объектов, имеет $R^2 = 0$.

Коэффициент *R-квадрат* может быть сколь угодно малым отрицательным числом. Такие модели неадекватны, поскольку результат их работы хуже, чем у постоянной модели.

Для приемлемых моделей предполагается, что коэффициент детерминации должен быть не менее 0,5. Модели с коэффициентом детерминации $>0,8$ считаются весьма хорошими. Значение $R^2 = 1$ означает функциональную зависимость между переменными.

Решающие деревья и ансамбли решающих деревьев

Ранее были рассмотрены различные алгоритмы машинного обучения, каждый из которых имеет свои границы применимости. Метод *k*-ближайших соседей [15] редко используется на практике по ряду причин. Этот метод склонен к переобучению и до его применения необходимо хранить большие объемы данных – практически всю обучающую выборку, что проблематично для реализации. Линейные алгоритмы часто используются благодаря своей простоте и устойчивости. Но практические задачи очень редко напоминают линейные алгоритмы. В некоторых задачах скрытые закономерности в данных, которые надо восстановить, оказываются нелинейными.

Рассмотрим для примера решающие правила для оценки сохраняемости свойств материала при климатическом старении. Решающие правила в машинном обучении – это правила вида «если ..., то ...», которые определяют принадлежность объекта к заданному классу (используется в задачах классификации). Допустим, если в течение 3 лет материал теряет не более 5 % прочности в год и климатические изменения отсутствуют, то в течение 5 лет он потеряет не более 25 % прочности. Например, решающее правило для проведения ремонта детали следующее: если деталь в течение 2 лет подвергалась коррозии и на ней есть сквозные повреждения, то ремонт делать нельзя.

Самый простой способ реализовать логические правила в алгоритме машинного обучения – это построить решающее дерево [16]. В каждой вершине решающего дерева находится некоторый вопрос, а ребра, выходящие из вершины, соответствуют ответам на этот вопрос. В случае бинарного ответа – это «да» или «нет», и получаем бинарное дерево, в листах которого записаны ответы алгоритма. Например, для построения дерева в задачах классификации в листах находятся метки классов, а для задач регрессии – действительные числа. На рис. 5 показан пример решающего дерева для задачи классификации растений (травянистые, лианы, кустарниковые, деревья) [17].

При поступлении на вход объекта, движение начинается вниз по ребрам дерева в то поддерево, которое соответствует ответу на вопрос в текущей вершине. В терминальной вершине стоит метка класса: семейство сосновые или болотный кипарис.



Рис. 5. Решающее дерево для задачи классификации растений [17]

Для конкретной обучающей выборки сложно найти решающее дерево. В библиотеках машинного обучения реализован алгоритм обучения решающего дерева. Комбинациями решающих правил можно приблизить ответы на обучающие выборки любой сложности, главное, чтобы у дерева была достаточная глубина. Такими свойствами не обладает, например, линейный алгоритм. Если при небольшой глубине дерева закономерность получается недостаточно детализированной, а при большой глубине слишком подробной, рассматривающей несущественные детали обучающей выборки, то в таком случае целесообразно использовать композицию (ансамбль) решающих деревьев.

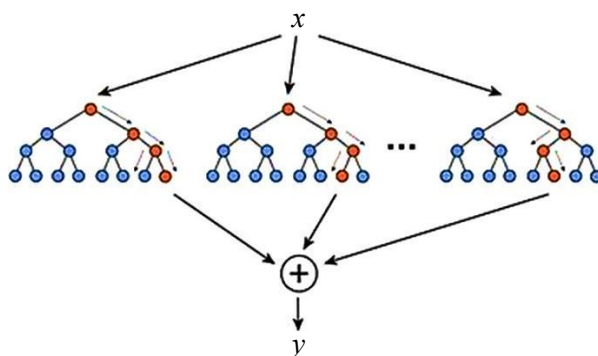


Рис. 6. Схема ансамбля из решающих деревьев [14]

Например, обучим не одно единственное дерево, а целый лес решающих деревьев для одной и той же задачи. Если для построения каждого дерева использовать случайную выборку исходных признаков, то все деревья будут отличаться друг от друга. Например, если построить сто различных деревьев и на стадии применения модели усреднять предсказания всех деревьев в случае регрессии или выбирать мнение большинства в случае классификации, то окажется, что такое усреднение дает хорошие результаты. Оно позволяет одновременно поддерживать обобщающую способность одного решающего дерева и нивелировать негативные эффекты от его переобучения. Решающий лес это распространенный алгоритм машинного обучения, но есть еще более эффективный способ – это построение ансамбля из решающих деревьев (рис. 6). Ансамбль в данном случае – это несколько алгоритмов машинного обучения, которые собраны в один алгоритм. Такой подход позволяет усилить положительные свойства рассматриваемых алгоритмов, которые в одиночку могут работать менее эффективно, чем в ансамбле. При использовании ансамбля методы алгоритмы учатся одновременно и могут исправлять ошибки друг друга.

Известными ансамблями моделей, направленных на объединение «слабых» алгоритмов в группу «сильных», являются: стекинг, бэггинг и бустинг.

В случае *стекинга* рассматривают разнородные отдельно взятые модели, которые подаются на вход объекта, а выходом является итоговый прогноз.

При использовании *бэггинга* рассматривают однородные модели, которые обучаются независимо и параллельно, а затем их результаты усредняются. Примером такого метода является случайный лес.

Для *бустинга* строят однородные модели, которые обучаются последовательно. Каждое следующее дерево старается по максимуму исправить ошибки всей предыдущей совокупности деревьев. Конкретных реализаций этой идеи много, а наиболее распространенным является градиентный бустинг. Этот алгоритм хорошо организован в нескольких специальных библиотеках – например, в CatBoost, XGBoost и LightGBM. Сама идея настолько плодотворна, что при достаточном количестве обучающих данных бустинг с большим отрывом опережает все остальные алгоритмы машинного обучения и выигрывает конкурсы по машинному обучению [18]. Главным недостатком бустинга является его склонность к переобучению. Кроме того, обучение и применение любых ансамблей занимает значительное время.

Искусственные нейронные сети

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – один из алгоритмов машинного обучения, который отличается большей сложностью и более широкой применимостью, чем другие алгоритмы.

Структура нейронной сети позаимствована для программирования из биологии. Биологические нейронные сети являются частью нервной системы человека и млекопитающих. Функциональной единицей нервной системы является нервная клетка, или нейрон. Нейросети – это последовательность нейронов, соединенных между собой синапсами.

Применение ИНС (*inference*) – это использование нейронной сети как алгоритма для получения выходных данных по входным данным с целью извлечения практической пользы.

В ИНС нейрон – это вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней простые вычисления и передает ее дальше. Один нейрон напоминает обобщенную логистическую регрессию, потому что активационная функция у нейрона может быть произвольной, а не только сигмоидальной, как у логистической регрессии.

В остальном нейрон также получает входные сигналы (исходные данные либо выходные сигналы других нейронов) через несколько входных каналов, складывает

полученные из входов числа (x), умноженные на веса (w), и пропускает их через активационную функцию (АФ) для получения ответа (y). Таким образом, принцип работы нейронной сети заключается в преобразовании входных сигналов, в результате чего изменяется внутреннее состояние сети и формируются выходные значения.

На рис. 7 показана упрощенная схема ИНС с тремя входными сигналами.

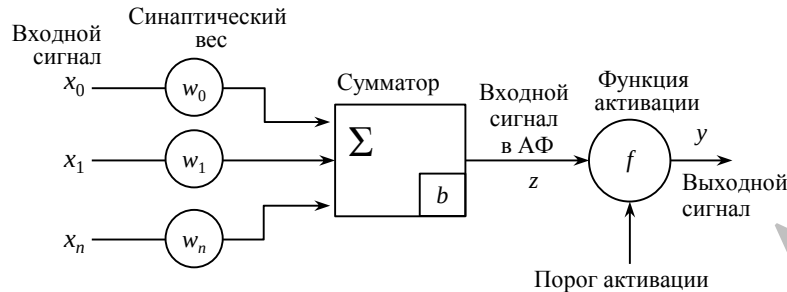


Рис. 7. Схема искусственного нейрона с тремя входными сигналами [19]

Допустим, есть три нейрона, которые передают информацию следующему нейрону, тогда есть три веса, соответствующие каждому из этих нейронов. Информация того нейрона, у которого вес будет больше, и будет доминирующей в следующем нейроне.

На рис. 7 каждый сигнал x_1, x_2, x_3 или x_n умножается на свой вес w , потом все это суммируется в сумматоре и получается суммарный сигнал z . Образуется входной сигнал в активационную функцию, обозначенную f , которая принимает решение: транслировать сигнал дальше или нет. Если сигнал будет передаваться дальше другому нейрону, то он придет к нему как входной сигнал u . Выходной сигнал u можно определить по формуле

$$y = f(z) = f(w_0x_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + b), \quad (6)$$

где x_i – входной сигнал; w_i – вес (настраиваемый параметр); b – смещение (настраиваемый параметр).

Пороговая функция активации определяется как

$$f(z) = \begin{cases} 0, & z \leq 0, \\ 1, & z > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Место, в котором функция $f(z)$ изменяет свое значение с 0 на 1, называется разделяющей поверхностью.

Для построения ИНС необходимо учесть: архитектуру нейронной сети (модель сети, число элементов и их связи), функцию потерь (ее минимум будет соответствовать наилучшему решению), метод оптимизации и метрики (показывают точность решения задачи).

Архитектура нейронной сети (*neural network architecture*) – это описание нейронной сети, в котором приведено, из каких слоев состоит нейронная сеть, каковы параметры этих слоев, описан процесс передачи данных между этими слоями, а также входом и выходом нейронной сети, но не указаны конкретные значения весов нейронной сети. Среди архитектур ИНС можно выделить следующие сети: сверточную или сеть распознавания образов; радиально-базисных функций или RBF-сеть, которая обеспечивает принятие решений, управление, аппроксимацию и прогнозирование; сеть Хопфилда – сжатие данных и ассоциативная память; сеть Кохонена – кластеризация [20], сжатие данных, анализ данных и оптимизация; перцептрон Розенблатта – распознавание образов, принятие решений, прогнозирование, аппроксимация, анализ данных и др. На рис. 8 показаны примеры некоторых архитектур ИНС.

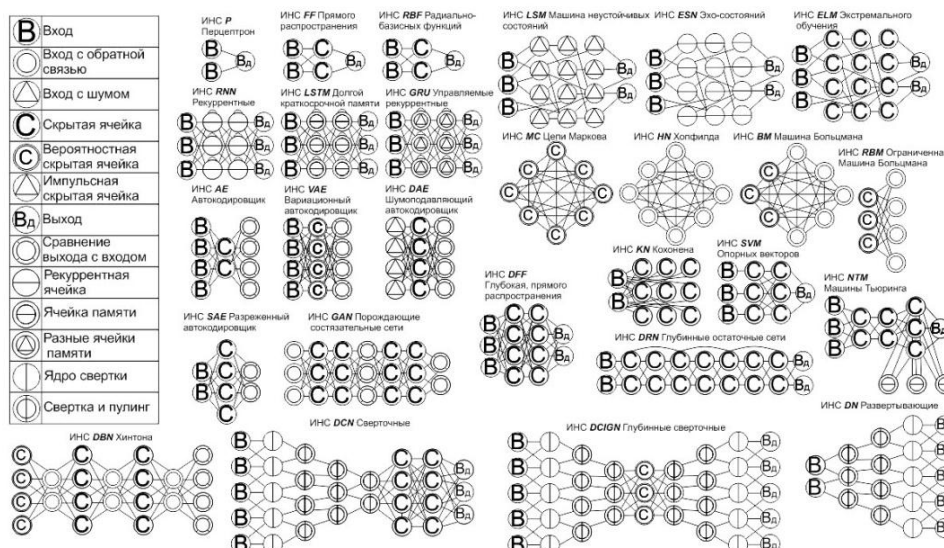


Рис. 8. Некоторые архитектуры искусственной нейронной сети (ИНС) [21]

Преимуществом нейронных сетей перед традиционными алгоритмами является возможность их обучения. Нейронные сети улучшаются на основе поступающих данных и произошедших ошибок.

Обучение ИНС может вестись с учителем или без него. В первом случае сети предъявляются значения как входных, так и желательных выходных сигналов, и она по некоторому внутреннему алгоритму подстраивает веса своих синаптических связей. Во втором случае выходы ИНС формируются самостоятельно, а веса изменяются по алгоритму, учитывающему только входные и производные от них сигналы. Существует множество алгоритмов обучения, которые можно условно поделить на два класса: детерминистские и стохастические. В первом случае подстройка весов представляет собой жесткую последовательность действий, во втором – она производится на основе действий, подчиняющихся некоторому случайному процессу. На рис. 9 показана классификация алгоритмов обучения ИНС, предложенная в работе [22].

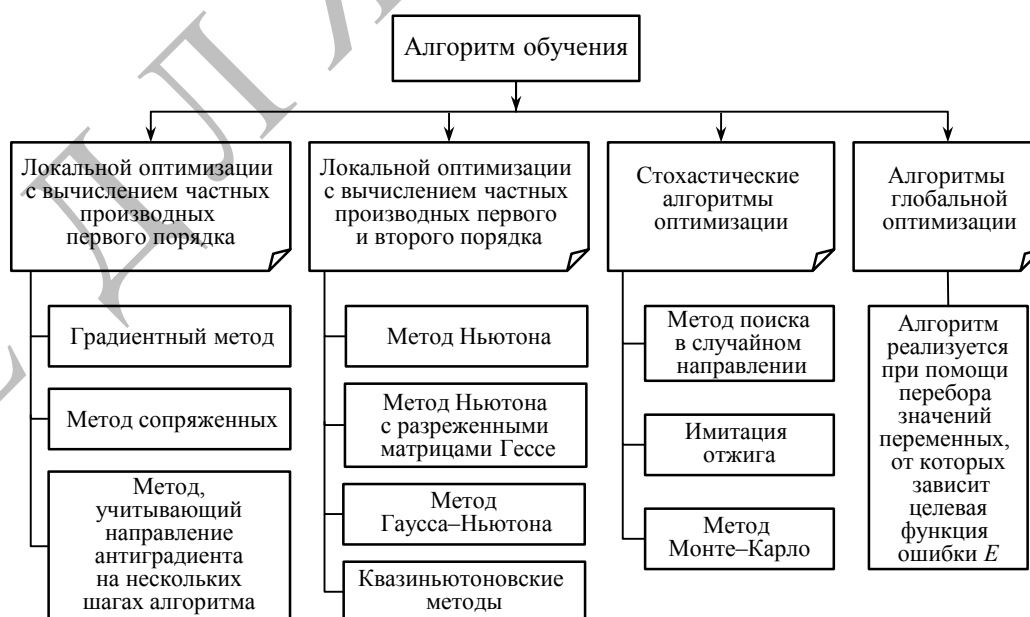


Рис. 9. Классификация алгоритмов обучения искусственной нейронной сети (ИНС) [22]

На рис. 10 показан пример решения задачи классификации с помощью ИНС (рис. 10, а), линейной регрессии (рис. 10, б) [23] и решающих деревьев (рис. 10, в).

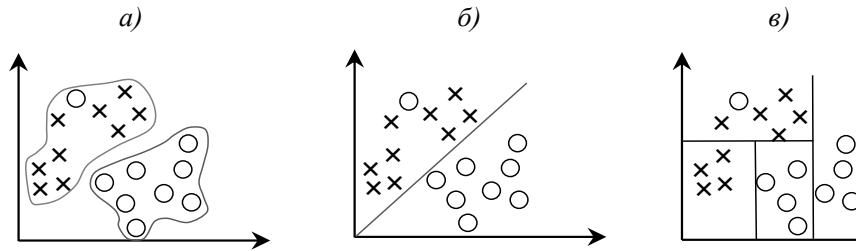


Рис. 10. Решение задачи классификации [20] методами нейронных сетей (а), линейной регрессии (б) и решающих деревьев (в)

Искусственные нейронные сети начинают широко применять в материаловедении, в том числе для прогнозирования физико-механических характеристик материалов в зависимости от химического состава, различных структурных, технологических и эксплуатационных параметров [24–28]. Например, в работе [29] разработана каскадная нейронная сеть оптимизации химического состава ферритно-мартенситной стали для повышения кратковременных механических свойств. Схема разработанной ИНС приведена на рис. 11. При разработке сети проведен анализ кратковременных механических свойств сталей марок ЭИ852, ЭП450, ЭП823, ЭП900. Определено влияние на свойства легирующих элементов, проведена серия расчетов по оптимизации химического состава для достижения максимального предела текучести. Результаты прогнозирования с помощью ИНС использовали при изготовлении новых экспериментальных плавок, исследование которых подтвердило корректность расчетов. Расширенное легирование дало возможность получить дополнительный массив экспериментальных данных, позволивших разработать вторую версию нейросетевой модели. Матрица независимых переменных включала: температуру испытания, °С; содержание легирующих элементов – С, Cr, Ni, Mn, Si, V, Mo, W, Nb, Ti, Ta, Zr, В, Fe – основа, % (по массе); структурные характеристики – доля феррита и мартенсита, % (объемн.); размеры областей мартенсита, мкм. В качестве отклика использовали значение предела текучести. Режимы термообработки были близкими и не были включены в перечень независимых переменных.

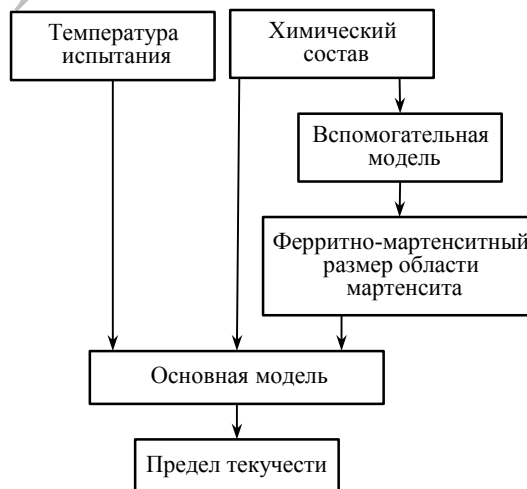


Рис. 11. Схема каскадной нейросетевой модели [29]

Конфигурацию ИНС определяли путем подбора числа узлов в скрытых слоях. Всего было рассмотрено 11 топологий. Исследование ИНС показало необходимость исключения из независимых переменных структурных характеристик, являющихся следствием химического состава. На рис. 11 видно, что химический состав вводится в основную и вспомогательную нейросетевую модель.

Наилучший результат по прогнозированию предела текучести и размеров структуры показала ИНС с 8 и 19 нейронами в ассоциативных слоях. Прогнозирование показало перспективу получения сплава оптимального легирования, который будет иметь более высокую жаропрочность по сравнению с используемыми сплавами.

Заключения

Представлены основные метрики машинного обучения и примеры их использования для решения прикладных задач.

Показаны особенности применения решающих деревьев и их ансамблей в задачах классификации и регрессии.

Перечислены основные принципы использования ИНС, их архитектуры и алгоритмы обучения, которые могут применяться при моделировании материала, прогнозировании изменения его свойств под действием внешних факторов и др.

Представлен пример алгоритма нейронной сети по прогнозированию зависимости предела текучести и размеров структуры от химического состава ферритно-мартенситной стали.

Список источников

1. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Нейросетевые технологии, нечеткая кластеризация и генетические алгоритмы в экспертной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 7 (156). С. 7–15.
2. Романова К.Е., Мишуров С.С., Румянцев Е.В., Матрохин А.Ю. Потенциал искусственного интеллекта при реализации генеративных образовательных технологий // Инженерное образование. 2019. № 26. С. 75–83.
3. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 1 (150). С. 83–92.
4. Мелихова О.А. Применение генетических алгоритмов для построения систем искусственного интеллекта // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 7 (144). С. 53–58.
5. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. Материаловедение: учеб. для вузов. Изд. 7-е. СПб.: Химиздат, 2020. 784 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
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 В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
9. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Лашов О.А., Подживотов Н.Ю., Качан Д.В. Численное исследование несущей способности слоистого материала // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 3. С. 16–21.
10. Антипов В.В., Орешко Е.И., Ерасов В.С., Серебренникова Н.Ю. Гибридные слоистые материалы для применения в условиях Севера // Механика композитных материалов. 2016. Т. 52. № 5. С. 687–698.

11. Димитриенко Ю.И., Луценко А.Н., Губарева Е.А., Орешко Е.И., Сборщиков С.В., Базылева О.А., Туренко Е.Ю. Интегрированная информационная система для хранения данных по свойствам жаропрочных никелевых сплавов и расчета их механических характеристик // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-86-94.
12. 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.
13. Сивак М.А., Тимофеев В.С. Построение робастных нейронных сетей с различными функциями потерь // *Система анализа и обработки данных*. 2021. Т. 82. № 2. С. 67–82.
14. Быстрый старт в искусственный интеллект. URL: <https://stepik.org/course/80782/promo> (дата обращения: 24.09.2021).
15. Афанасьев К.Е., Макачук Р.С., Попов А.Ю. Алгоритм поиска ближайших соседей в методе сплайнов и его параллельная реализация // *Вычислительные технологии*. 2008. Т. 13. № S5. С. 9–13.
16. Гасфилд Д. Строки, деревья и последовательности в алгоритмах: Информатика и вычислительная биология. СПб.: Невский диалект; БХВ-Петербург, 2003. 653 с.
17. Баженов Р.И. Интеллектуальные информационные технологии в управлении: учеб. пособие. Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2018. 117 с.
18. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2021. 480 с.
19. Келлер Ю.А. Разработка искусственных нейронных сетей для предсказания технологической эффективности от выравнивания профиля приемистости // *Известия Томского политехнического университета. Информационные технологии*. 2014. Т. 325. № 5. С. 60–65.
20. Чубукова И.А. Data Mining. М.: ИНТУИТ; Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2020. 469 с.
21. Van Veen F., Leijnen S. Neural Network Zoo. URL: www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/ (дата обращения: 15.09.2021).
22. Павлова А.И. Информационные технологии: основные положения теории искусственных нейронных сетей: учеб. пособие. Новосибирск: НГУЭУ, 2017. 191 с.
23. Базилевский М.П., Власенко Л.Н. Оценивание моделей парной линейной регрессии с параметрами в виде матриц линейных операторов двумерного векторного пространства // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020. Т. 8. № 1 (28). С. 6–7.
24. Каширина И.Л., Демченко М.В. Исследование и сравнительный анализ методов оптимизации, используемых при обучении нейронных сетей // *Вестник ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. № 4. С. 123–132.
25. Микелуччи У. Прикладное глубокое обучение. Подход к пониманию глубоких нейронных сетей на основе метода кейсов: пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2020. С. 120–121.
26. Нейронные сети и компьютерное зрение. URL: <https://stepik.org/course/50352/promo> (дата обращения: 24.09.2021).
27. Лебедев И.С. Сегментирование множества данных с учетом информации воздействующих факторов // *Информационно-управляющие системы*. 2021. № 3. С. 29–38.
28. Попов А.А., Холдонов А.А. Сравнительное исследование точности локального и глобального оценивания параметров регрессионных моделей при использовании различных типов М-оценок // *Научный вестник НГТУ*. 2017. Т. 69. № 4. С. 67–84.
29. Рачков В.И., Образцов С.М., Соловьев В.А. и др. Оптимизация химического состава ферритно-мартенситной стали в целях повышения кратковременных механических свойств // *Атомная энергия*. 2013. Т. 115. Вып. 1. С. 22–27.

References

1. Polkovnikova N.A., Kureichik V.M. Neural network technologies, fuzzy clustering and genetic algorithms in an expert system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 7 (156), pp. 7–15.
2. Romanova K.E., Mishurov S.S., Rumyantsev E.V., Matrokhin A.Yu. The potential of artificial intelligence in the implementation of generative educational technologies. *Inzhenernoe obrazovanie*, 2019, no. 26, no. 75–83.

3. Polkovnikova N.A., Kureichik V.M. Development of an expert system model based on fuzzy logic. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 1 (150), pp. 83–92.
4. Melikhova O.A. Application of genetic algorithms for the construction of artificial intelligence systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 7 (144), pp. 53–58.
5. Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I. *Materials science: textbook for universities*. 7th ed. St. Petersburg: Khimizdat, 2020, 784 p.
6. 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.
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 V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
9. Oreshko E.I., Erasov V.S., Lashov O.A., Podzhivotov N.Yu., Kachan D.V. Numerical study of the bearing capacity of a layered material. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2019, no. 3, pp. 16–21.
10. Antipov V.V., Oreshko E.I., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu. Hybrid layered materials for use in the conditions of the North. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 687–698.
11. Dimitrienko Yu.I., Lucenko A.N., Gubareva E.A., Oreshko E.I., Sborshnikov S.V., Bazyleva O.A., Turenko E.Yu. The data storage integrated information system on properties of heat resistant nickel alloys and calculation of their mechanical characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 1 (46), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-86-94.
12. 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.
13. Sivak M.A., Timofeev V.S. Building Robust Neural Networks with Different Loss Functions. *Sistema analiza i obrabotki dannykh*, 2021, vol. 82, no. 2, pp. 67–82.
14. *Quick start in artificial intelligence*. Available at: <https://stepik.org/course/80782/promo> (accessed: September 24, 2021).
15. Afanasiev K.E., Makarchuk R.S., Popov A.Yu. Nearest neighbor search algorithm in the smoothed particle method and its parallel implementation. *Vychislitelnye tekhnologii*, 2008, vol. 13, no. S5, pp. 9–13.
16. Gasfield D. *Strings, trees and sequences in algorithms: Informatics and computational biology*. St. Petersburg: Nevsky dialect; BHV-Petersburg, 2003, 653 p.
17. Bazhenov R.I. *Intellectual information technologies in management: textbook*. Saratov: IPR Media, 2018, 117 p.
18. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep learning*. St. Petersburg: Piter, 2021, 480 p.
19. Keller Yu.A. Development of artificial neural networks for predicting technological efficiency from injectivity profile alignment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Informatsionnye tekhnologii*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 60–65.
20. Chubukova I.A. *Data mining*. Moscow: INTUIT; Saratov: IPR Media, 2020, 469 p.
21. Van Veen F., Leijnen S. *Neural Network Zoo*. Available at: www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo/ (accessed September 15, 2021).
22. Pavlova A.I. *Information technology: the main provisions of the theory of artificial neural networks: textbook*. Novosibirsk: NSUEU, 2017, 191 p.
23. Bazilevsky M.P., Vlasenko L.N. Estimation of models of pair linear regression with parameters in the form of matrices of linear operators of two-dimensional vector space. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*, 2020, vol. 8, no. 1 (28), pp. 6–7.

24. Kashirina I.L., Demchenko M.V. Research and comparative analysis of optimization methods used in training neural networks. *Vestnik VGU. Ser.: System analysis and information technology*, 2018, no. 4, pp. 123–132.
25. Michelucci U. *Applied deep learning. An approach to understanding deep neural networks based on the case method*: trans from Engl. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2020, pp. 120–121.
26. *Neural networks and computer vision*. Available at: <https://stepik.org/course/50352/promo> (accessed: September 24, 2021).
27. Lebedev I.S. Segmentation of a set of data taking into account information of influencing factors. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2021, no. 3, pp. 29–38.
28. Popov A.A., Holdonov A.A. Comparative study of the accuracy of local and global estimation of regression model parameters using different types of M-estimates. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2017, vol. 69, no. 4, pp. 67–84.
29. Rachkov V.I., Obratsov S.M., Soloviev V.A. et al. Optimization of the chemical composition of ferritic-martensitic steel in order to improve short-term mechanical properties. *Atomnaya energiya*, 2013, vol. 115, is. 1, pp. 22–27.

Информация об авторах

Евгений Игоревич Орешко, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Владимир Сергеевич Ерасов, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибаяев Илья Гоярович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Луценко Алексей Николаевич, заместитель начальника Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шершак Павел Викторович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgeny I. Oreshko, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir S. Erasov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya G. Sibayev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey N. Lutsenko, Deputy Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Pavel V. Shershak, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.11.2021; получена после доработки 24.01.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.01.2022.
The article was submitted 29.11.2021; received in revised form 24.01.2022; approved and accepted for publication after reviewing 25.01.2022.



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



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

**ПРОИЗВОДСТВО РАСХОДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ: КАТОДЫ И МИШЕНИ.**

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



Цилиндрический
металлический катод



Вакуумная ионно-плазменная установка
МАП-3



Установка среднечастотного магнетронного
напыления УОКС-3

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ppf; www.viam.ru



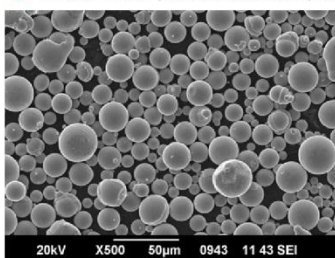
ПАЙКА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ



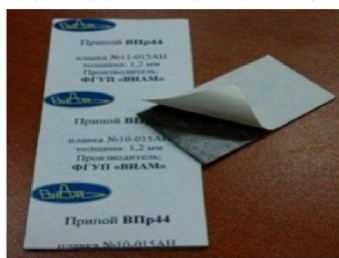
**РАЗРАБОТКА ПРИПОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ, ТИТАНОВЫХ,
МЕДНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ
В ОДНОИМЕННОМ И РАЗНОИМЕННОМ
СОЧЕТАНИЯХ, ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И СЛОЖНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ.**

НИКЕЛЕВЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ И ТИТАНОВЫЕ ПРИПОИ:

- прочность паяных соединений на уровне 0,7–0,95 от прочности соединяемых материалов;
- совмещение режима пайки с режимом термообработки основного материала.

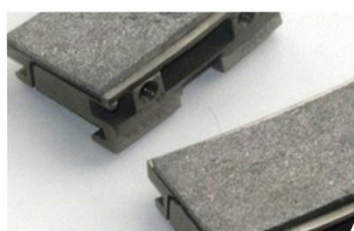


- сферическая форма гранул;
- низкое содержание кислорода (менее 0,010%).



Припои на органическом связующем в виде самоклеящихся лент:

- срок хранения 12 месяцев;
- толщина – от 0,5 до 5 мм;
- надежная фиксация на изделии.



НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРИПОИ:

- прочность паяных соединений в 1,5–2,5 раза выше по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями;
- коррозионная стойкость в 2–4 раза выше по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями.

СЕРИЙНО ПРОИЗВОДЯТСЯ И ПОСТАВЛЯЮТСЯ ПРИПОИ МАРОК:

- титановые – ВПр16, ВПр28;
- никелевые – ВПр11, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр42, ВПр44, ВПр50;
- низкотемпературные – ВПр35, ВПр40.

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

на правах рекламы

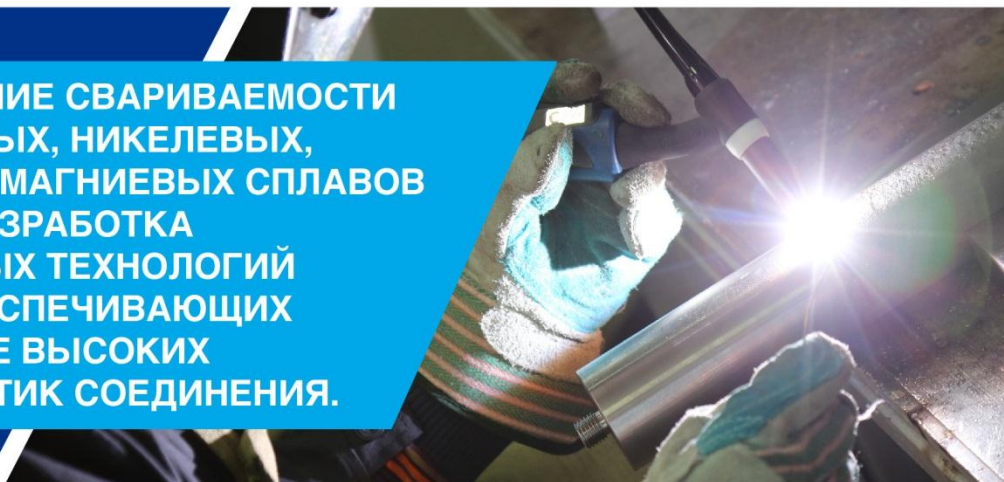
E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pf; www.viam.ru



СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ
АЛЮМИНИЕВЫХ, НИКЕЛЕВЫХ,
ТИТАНОВЫХ, МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ
И СТАЛЕЙ, РАЗРАБОТКА
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СВАРКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
ДОСТИЖЕНИЕ ВЫСОКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЯ.



Комплекс электронно-лучевой
сварки на базе установки
АЭЛТК-11-486

до 1 500 образцов
в год
до 1 000 валов
в год



до 5 000
типовых образцов
в год

Роботизированный технологический
комплекс лазерной гибридной
сварки Laser Weld 8R60

Комплекс дуговой сварки
на базе EWM415

до 2 000 образцов
в год



до 1 500 образцов
в год

Ротационная сварка
трением

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку технологий сварки плавлением (автоматическая аргоно-дуговая сварка (ААрдЭС), лазерная сварка (ЛС), электронно-лучевая сварка (ЭЛС), гибридная сварка (ГС) и др.) современных конструкционных материалов;
- разработку технологий сварки в твердой фазе: сварка трением с перемешиванием (СТП), ротационная сварка трением (РСТ), полуфабрикатов из алюминиевых, никелевых, титановых сплавов и сталей.

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.pcf; www.viam.ru



ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ПЛАНЕРА И ДВИГАТЕЛЯ САМОЛЕТА



РЕШЕНИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ
ЗАДАЧ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ,
ЖАРОПРОЧНЫХ, ЛИТЕЙНЫХ
И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ТИТАНОВЫХ
СПЛАВОВ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ
ПОЛУФАБРИКАТОВ И ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Производственные
мощности

до **150** шт. фасонных отливок
в год

до **500** шт. штамповок
в год

Рентгенодифракционный анализ титановых сплавов

до **200** шт. образцов
в год

Термическая обработка малогабаритных
полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов

до **3000** кг в год

Металлографический анализ структуры титановых сплавов.
Определение твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу

до **1000** шт. образцов
в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

■ отливки из литейных титановых сплавов;

■ штамповки дисков и лопаток из жаропрочных титановых сплавов.

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.pф; www.viam.ru



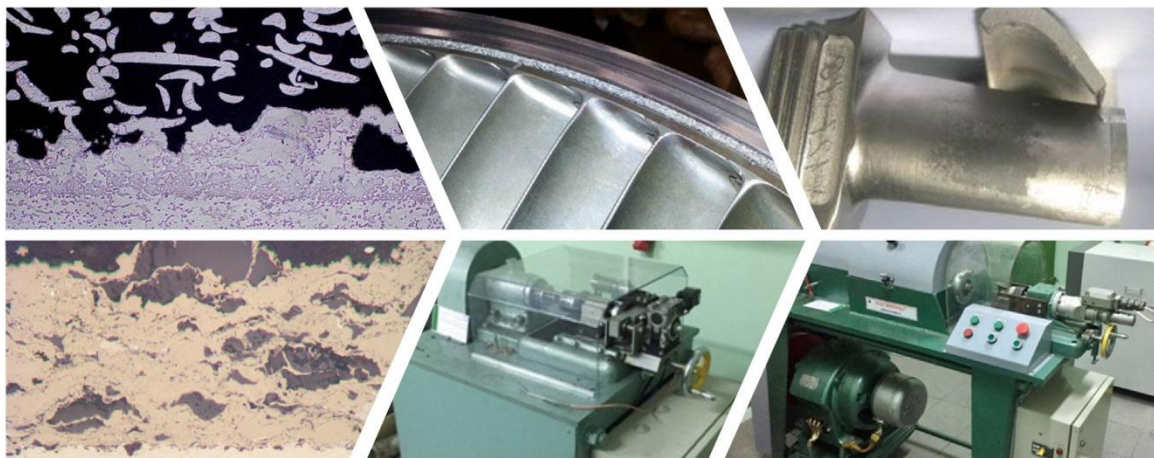
УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД



РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД – ИСТИРАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТАТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ, АБРАЗИВНО-ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОРЦОВ РАБОЧИХ ЛОПАТОК. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ТРЕНИЯ.



- разработка и исследование эксплуатационных свойств уплотнительных материалов проточной части ГТД – истираемых материалов для статорных деталей компрессора и турбины, абразивно-износостойких материалов для торцов рабочих лопаток;
- разработка уплотнительных материалов и технологий их нанесения на детали ГТД;
- изготовление опытных партий истираемых уплотнительных элементов на основе металлических волокон;
- исследование эксплуатационных характеристик уплотнительных материалов проточной части (проведение комплекса исследований и испытаний, позволяющих дать оценку эффективности применения истираемых и абразивно-износостойких материалов турбины и компрессора ГТД).



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку уплотнительных материалов по техническому заданию;
- проведение исследований эксплуатационных характеристик уплотнительных материалов с выдачей заключения;
- совместные работы по опробованию новых уплотнительных материалов в изделиях заказчика.

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



УНТЦ ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



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
органоластиков
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.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- 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 органоластик ВКО-19;
- формообразующая оснастка из ПКМ (с рабочей температурой до 180°C);
- листовой органоластик 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.viam.pф; www.viam.ru; untc.viam.ru



ВЭТЦ ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



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

НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ 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



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- изготовление пластин и дисков бериллиевых герметичных, фольги бериллиевой вакуум-плотной радиационно-прозрачной повышенной чистоты толщиной от 10 мкм; паяных бериллиевых окон для рентгеновской техники; полуфабрикатов и изделий из бериллия по чертежам заказчика;
- нанесение гальванических и комплексных защитных покрытий на изделия из бериллия;
- выплавку сплавов ВНС-32 и 97НЛ-ВИ, алюминий-бериллиевой лигатуры АБ-1 и АБ-2, медно-бериллиевой лигатуры МБ-1 и МБ-2;
- изготовление прутков диаметром 12–60 мм из жаропрочной бериллийсодержащей коррозионностойкой стали марки ВНС-32-ВИ, ленты из бериллийсодержащего сплава 97НЛ-ВИ;
- изготовление клеев и клеевых связующих: ВСЭ-1212, ВСП-3М, ВСК-14-2МР, ВСК-14-2М, ВСВ-43, ВСЭ-34, ВСЭ-37, ВСЭ-33, ВПБ-45, ВСЭ-39, РСФ-250, ВСК-14-3, ВСК-14-4М;
- изготовление препрегов ПКМ шириной 300 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.viam.pф; www.viam.ru; vetc.viam.ru



ГЦКИ ВИАМ
ИМ. Г.В. АКИМОВА –
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



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:**

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:

	Прочностные испытания
	Методы неразрушающего контроля
	Металлография
	Электрохимия и исследование покрытий
	Искусственный климат
	Испытания при отрица- тельных температурах и тепловом ударе
	Температурные испытания
	Аналитическая лаборатория



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	



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- 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 статьи должна быть подписана всеми авторами.

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 A4;
- 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.



КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ 2022

25
марта

XIV Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике:
«Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов»
Посвящена 115-летию со дня рождения д.т.н., профессора Николая Митрофановича Склярова

15
апреля

III Всероссийская научно-техническая конференция
«Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники»
Посвящена Дню космонавтики

26–27
мая

VII Всероссийская научно-техническая конференция
«Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы»
Посвящена 125-летию со дня рождения авиаконструктора, ученого-аэродинамика Роберта Людвиговича Бартини

27
июня

III Международная научно-техническая конференция
«Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России»
Посвящена 90-летию ВИАМ



сентябрь

IV Международная научно-техническая конференция
«Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате»
Проводится в рамках выставки «Гидроавиасалон-2022»

6–7
октября

VIII Международная конференция
«Аддитивные технологии: настоящее и будущее»

28
октября

Круглый стол
«Перспективные способы сварки в авиастроении»

18
ноября

VI Всероссийская научно-техническая конференция
«Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»

9
декабря

V Всероссийская научно-техническая конференция
«Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия»

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:



+7 (499) 263-87-69
Наталья Владимировна Войтенко
+7 (499) 263-89-17
Денис Николаевич Таукчи

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.prf; www.viam.ru