

№12
(142)
2024

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ТРУДЫ ВИАМ



ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 12 (142) декабрь 2024

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

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

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

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

Члены совета:

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

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

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

Адрес редакции:

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

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

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

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

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

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

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

Жаропрочные сплавы и стали

Базылева О.А., Вусик Е.М., Морозова Л.В., Лонская Н.А. Перспектива применения монокристаллического интерметаллидного сплава ВИН4М для статорных деталей вертолетных двигателей

Власов И.И., Севальнев Г.С., Ляхов А.А., Неведкин Д.Ю. Исследование структуры и механических свойств Ni–Co–Cr энтропийного сплава в литом состоянии

Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Анализ причин разрушения деталей редукторов методами оптической и растровой микроскопии

Полимерные материалы

Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваяев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов

Композиционные материалы

Гамазина А.В., Курносоев А.О., Вавилова М.И., Кочетов Н.Р. Исследование свойств стеклопластика радиотехнического назначения на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212

Судьин Ю.И., Салахова Р.К., Галиуллин Ан.Р., Савицкий Р.С. Исследование поверхностно-энергетических характеристик элементов трехслойных сотовых панелей

Макрушин К.В., Баранников А.А., Ищенко И.А., Судьин Ю.И. Вопросы оценки герметичности тканепленочных материалов и изготовленных из них гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха

CONTENTS

Heat-resistant alloys and steels

Bazyleva O.A., Visik E.M., Morozova L.V., Lonskaya N.A. The prospect of using the monocrystalline intermetallic alloy VIN4M for stator parts of helicopter engines

Vlasov I.I. Sevalnev G.S., Lyahov A.A., Nefedkin D.Yu. Study of the structure and mechanical properties of Ni–Co–Cr entropy alloy in the cast state

Morozova L.V., Grigorenko V.B., Terekhin A.M. Analysis of the causes of destruction of gearbox parts by methods of optical and scanning microscopy

Polymer materials

Tkachyk A.I., Kyznecova P.A., Donetskii K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs

Composite materials

Gamazina A.V., Kurnosov A.O., Vavilova M.I., Kochetov N.R. Investigation of fiberglass properties based on the melt binder VSE-1212 for radio engineering purposes

Sudin Yu.I., Salakhova R.K., Galiullin An.R., Savitsky R.S. Study of surface-energy characteristics of elements of three-layer honeycomb panels

Makrushin K.V., Barannikov A.A., Ishchenko I.A., Sudyin Yu.I. Issues of assessing the tightness of fabric-film materials and flexible pipelines of air conditioning systems made of them

Испытания материалов

Косарина Е.И., Гримова А.П., Осияненко Н.В., Смирнов А.В. Режимы рентгеновского экспонирования при контроле изделий, выполненных по аддитивным технологиям

Монин С.А., Медведев П.Н., Пономарев К.Е., Стрельников И.В. Характеристики сплава АМг6 при статическом и циклическом нагружении

Material tests

85 **Kosarina E.I., Grimova A.P., Osiyanenko N.V., Smirnov A.V.** Modes of X-ray exposure for parts, made using additive technologies

96 **Monin S.A., Medvedev P.N., Ponomarev K.E., Strelnikov I.V.** Characteristics of AMg6 alloy under static and cyclic loading

Научная статья

УДК 669.017.165

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА ВИН4М ДЛЯ СТАТОРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.А. Базылева¹, Е.М. Висик¹, Л.В. Морозова¹, Н.А. Лонская¹

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

Аннотация. Представлены микроструктурные исследования монокристаллических образцов с кристаллографической ориентацией [001] из интерметаллидного сплава ВИН4М в литом состоянии и после полной термической обработки, а также образцов, прошедших длительные статические испытания. Проведено фрактографическое исследование образцов после длительных испытаний при различных температурах и напряжениях. Разработана технология отливки заготовок сопловых лопаток и в производственных условиях получена партия монокристаллических отливок сопловых лопаток из интерметаллидного сплава ВИН4М с высоким выходом годного.

Ключевые слова: интерметаллид, монокристалл, структура, фазовый состав, высокотемпературная обработка, длительная прочность, сопловые лопатки

Для цитирования: Базылева О.А., Висик Е.М., Морозова Л.В., Лонская Н.А. Перспектива применения монокристаллического интерметаллидного сплава ВИН4М для статорных деталей вертолетных двигателей // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17.

Scientific article

THE PROSPECT OF USING THE MONOCRYSTALLINE INTERMETALLIC ALLOY VIN4M FOR STATOR PARTS OF HELICOPTER ENGINES

O.A. Bazyleva¹, E.M. Visik¹, L.V. Morozova¹, N.A. Lonskaya¹

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 microstructural studies of monocrystalline samples of crystallographic orientation [001] of the intermetallic alloy VIN4M in the cast state, after complete heat treatment and samples that have passed long-term static tests. A fractographic study of samples that have undergone long-term tests at various temperatures and stresses is also presented. The technology of casting blanks of nozzle blades has been developed and a batch of monocrystalline nozzle blade castings made of intermetallic alloy VIN4M with high yield has been obtained in production conditions.

Keywords: intermetallic compound, single crystal, structure, phase composition, high temperature treatment, long-term strength, nozzle blades

For citation: Bazyleva O.A., Visik E.M., Morozova L.V., Lonskaya N.A. The prospect of using the monocrystalline intermetallic alloy VIN4M for stator parts of helicopter engines. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-3-17.

Введение

В настоящее время созданы, опробуются и внедряются для изготовления монокристаллических лопаток турбины перспективных газотурбинных двигателей (ГТД) жаропрочные никелевые сплавы, в то числе содержащие рений и рутений [1–7]. Для снижения массы двигателя и повышения его рабочих температур целесообразно использовать интерметаллидные высокотемпературные материалы с термостабильной структурой [8–16]. С этой целью для получения способом направленного затвердевания в вакуумной плавильно-заливочной установке литых полуфабрикатов из жаропрочного ренийсодержащего сплава ВИН4М (с высокими служебными характеристиками в интервале температур до 1150–1200 °С) необходимо разработать серийную технологию изготовления [17–21] монокристаллических отливок из этого сплава [22] и их термическую обработку [23]. Использование теплозащитных покрытий (ТЗП) для деталей ГТД, а также термобарьерного слоя в схеме построения покрытия служит для увеличения ресурса эксплуатации деталей и узлов современных ГТД. Термобарьерный слой при рабочих температурах имеет теплопроводность в 5–10 раз ниже, чем конструкционный сплав. Опытным путем показано, что при активном теплоотводе при толщине термобарьерного слоя 70–200 мкм температура снижается на 50–150 °С, что обеспечивает увеличение срока эксплуатации комбинированного покрытия [24, 25].

Постановка на перспективный вертолетный двигатель монокристаллических сопловых лопаток из конструкционного жаропрочного никелевого сплава с комбинированным ТЗП обеспечит повышение рабочей температуры деталей до 1150 °С с забросами до 1200 °С.

В данной статье представлены исследования монокристаллических образцов с кристаллографической ориентацией (КГО) [001], прошедших длительные статические испытания, и отливок сопловых лопаток, полученных в опытно-промышленном производстве из конструкционного литейного сплава.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали высокотемпературный сплав системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–Ta–Mo–W–PЗМ (редкоземельный металл) [26]. Расчет химического состава исследуемой композиции проводили по формуле, основанной на правилах:

- Юм–Розери – в соответствии с которым кристаллическая структура интерметаллидных композиций характеризуется определенной плотностью валентных электронов ($\bar{E}$);
- компенсационного изоморфизма – согласно которому в композиции Ni_3Al образуется твердый раствор замещения:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n e_i a_i \text{ [эл./ат.]},$$

где $\bar{E}$ – средняя электронная концентрация; e_i – концентрация валентных электронов элемента; a_i – атомный процент элемента.

Согласно гетерофазной теории академика С.Т. Кишкина, высокий уровень жаропрочности интерметаллидных сплавов на основе никеля в интервале температур 1000–1200 °С достигается при плотности валентных электронов $\bar{E} = 8,37\text{--}8,40$ эл./ат. [27, 28], а термостабильность поддерживается балансом легирования:

$$\begin{cases} \Delta E = \sum E_i C_i - (0,036 \sum A_i C_i + 6,28) \\ -0,02 < \Delta E \leq 0,02, \end{cases}$$

где C_i – концентрация i -го химического элемента в составе композиции сплава; A_i – атомная масса i -го элемента; E_i – число валентных электронов i -го химического элемента; ΔE – величина, определяющая дисбаланс легирования.

Диапазон отклонений $\Delta E = \pm 0,02$ учитывает погрешность определения химического состава, а превышение этого диапазона влечет за собой фазовую нестабильность сплава [29–31].

Выплавку литой прутковой заготовки осуществляли в вакуумных индукционных печах [32, 33]. Изготовление заготовок образцов и полуфабрикатов сопловых лопаток производили способом направленного затвердевания в вакуумной плавильно-заливочной установке УВНК-9А [17–21]. С целью создания в образцах заданной КГО использовали затравки из композиции, имеющей температуру плавления выше аналогичной температуры основного сплава [22]. Полную термическую обработку проводили следующим образом: две стадии в баротермической установке «Квинтус-16» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, затем высокотемпературный отжиг в открытых камерных печах сопротивления типа СНОЛ, используемых для проведения термической обработки полуфабрикатов из жаропрочных никелевых, кобальтовых и других тугоплавких сплавов при температуре до 1300 °С, с погрешностью по объему печи не более ± 5 °С [23]. Для нанесения двухслойного никель-алюминиевого покрытия использовали ионно-плазменный метод, а для нанесения термобарьерного керамического слоя – метод атмосферного плазменного напыления [24, 25].

Микроструктурный анализ образцов проводили на растровом электронном микроскопе [34–36]. Фрактографический анализ изломов испытанных образцов осуществлен с применением сканирующего электронного микроскопа [37].

Статические испытания на жаропрочность выполняли по стандартной методике согласно ГОСТ 10145–81 [38].

Долю пор определяли методом количественного металлографического анализа при увеличении $\times 200$.

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

Результаты и обсуждение

Сравнительный микроструктурный анализ показал, что сплав имеет дендритно-ячеистое строение (рис. 1, а, з), оси дендритов и междендритные пространства содержат γ' -фазу, разделенную тонкими пластичными выделениями γ -твердого раствора. В осях частицы γ' -фазы мельче, чем в междендритных пространствах, и имеют кубоидную огранку (рис. 1, б, д), что является закономерным для монокристаллической структуры серийных жаропрочных сплавов. В междендритных пространствах наряду с частицами γ' -фазы неправильной формы и разного размера расположены выделения эвтектической γ' -фазы и неравновесной эвтектики $\gamma' + \beta$ (рис. 1, в). В процессе полной термической обработки, включающей газостатирование, в междендритных областях происходит полное растворение β -фазы и кубоидные частицы γ' -фазы заметно укрупняются (рис. 1, е).

С помощью растрового электронного микроскопа, оснащенного энергодисперсионным спектрометром, проведено исследование образцов, прошедших длительные высокотемпературные испытания при 900, 1000 и 1100 °С:

- при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч;
- при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч;

- при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч;
- при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч;
- при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч;
- при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч.

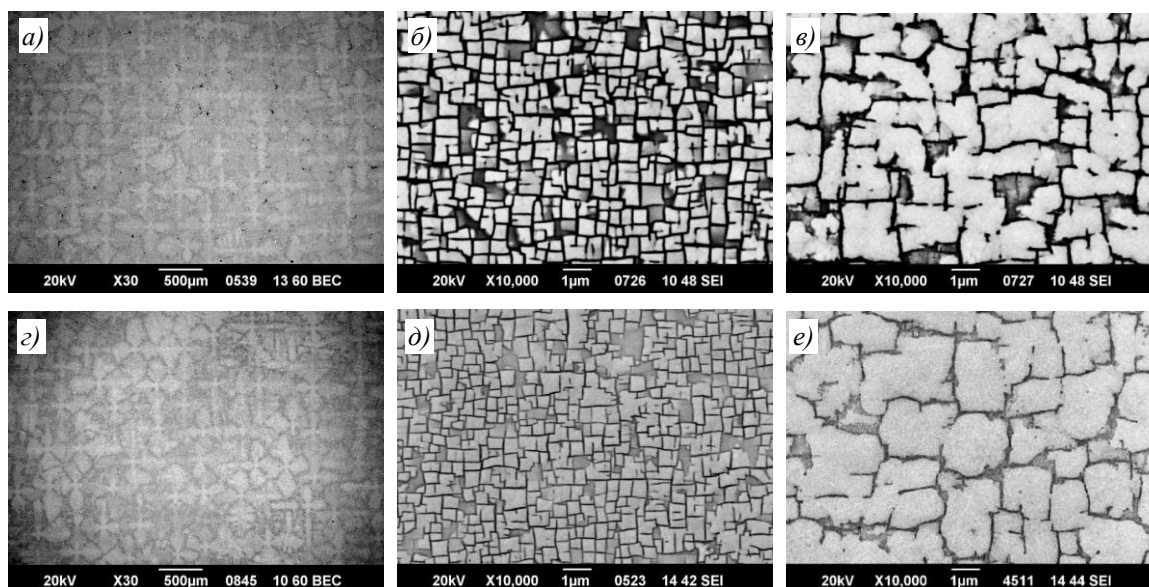


Рис. 1. Микроструктуры заготовок образцов в литом состоянии (а–в) и после полной термической обработки (г–е)

Микроструктурный анализ испытанных образцов показал, что под воздействием высокой температуры, а также напряжения в рабочей части произошла коагуляция – γ' -фаза превратилась в сплошную матричную фазу, а γ -твердый раствор имеет вид включений (рис. 2). В образцах, испытанных при температурах 900 и 1000 °С, в осях дендритов и междендритных участках обнаружено выделение избыточных фаз различной формы (рис. 2, а, б, г, д), а в образцах, испытанных при температуре 1100 °С (рис. 2, в, е), в осях дендритов и междендритных участках прослойки γ -твердого раствора уширяются и в них наблюдается выделение дисперсных вторичных частиц γ' -фазы (в осях дендритов в меньшем количестве).

Фрактографическое исследование структуры показало, что разрушение образцов, испытанных при температуре 900 °С и напряжениях 280 и 155 МПа, развивалось от поверхности, где присутствуют участки с высокотемпературным окислением излома (рис. 3, а, в). На поверхности излома имеются поры со сглаженным рельефом и также следами высокотемпературного окисления (рис. 3, б, в). В участках излома, свободных от пор, разрушение прошло внутризеренно с формированием рельефа, типичного при разрушении жаропрочных никелевых сплавов (рис. 3, г). Анализ изломов образцов после испытаний при температуре 1000 °С и напряжениях 140 и 65 МПа показал аналогичную картину – начало разрушения проходило от микротрещин на поверхности образцов (рис. 3, д), затем внутризеренно на участках, свободных от пор. Следует отметить, что количество пор в образцах, испытанных при температуре 1000 °С, меньше, чем при температуре 900 °С (рис. 3, г). Можно предположить, что из-за меньшего напряжения мелкие поры могут «залечиваться» в процессе испытания. Разрушение при температуре 1100 °С и напряжениях 60 и 35 МПа развивалось от микротрещин на поверхности образца (рис. 3, ж) и внутризеренно (рис. 3, з). Отличительной особенностью таких образцов является большое количество оксидов различных размеров и морфологии (рис. 3, и), что, по-видимому, связано с высокой температурой испытания.

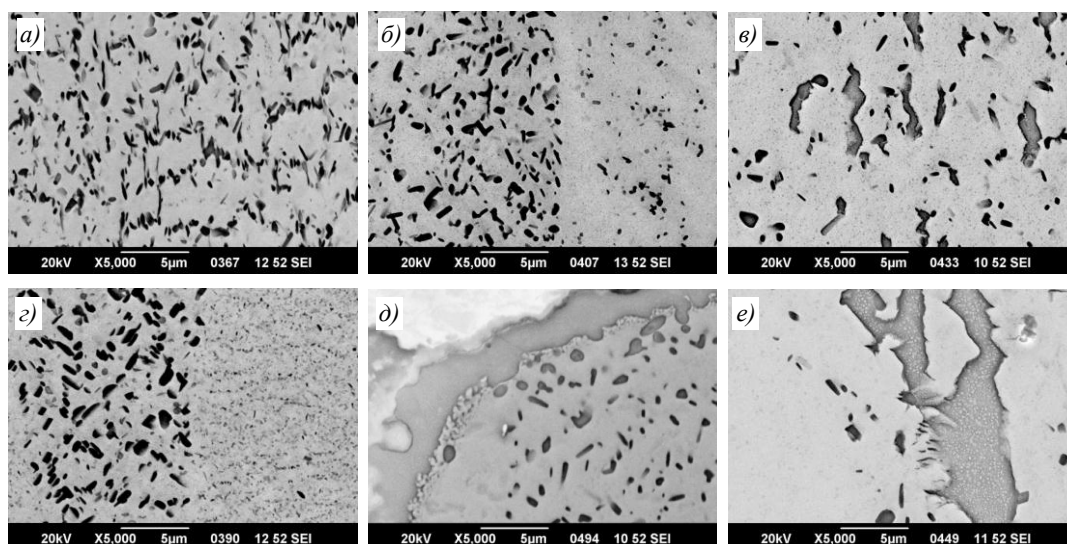


Рис. 2. Микроструктуры разрушенных образцов после длительных высокотемпературных испытаний: *а* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч (ось дендрита первого порядка); *б* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч (в междендритной области); *в* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч (ось дендрита первого порядка); *г* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч (в междендритной области); *д* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч (место разрушения и пора); *е* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч (в междендритной области)

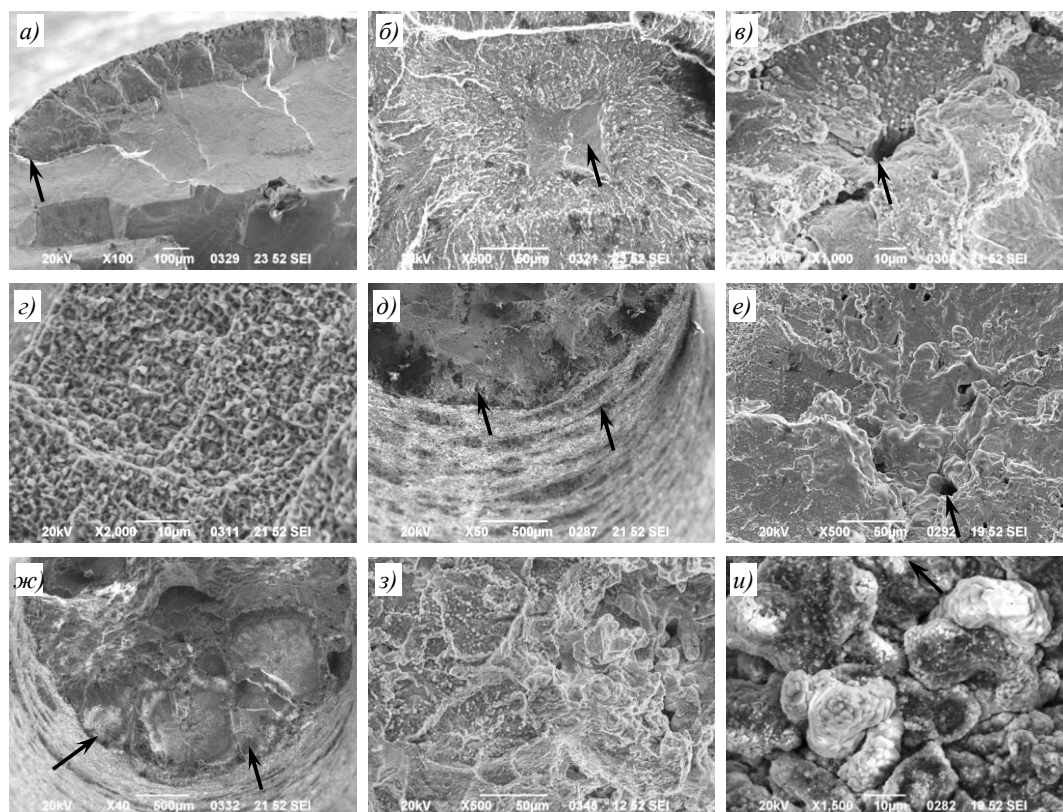


Рис. 3. Фрактографический анализ образцов из интерметаллидного сплава ВИН4М после испытаний на длительную прочность при повышенных температурах: *а, б* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 280$ МПа – в течение 156 ч; *в, г* – при 900 °С и напряжении $\sigma = 155$ МПа – в течение 539 ч; *д* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 140$ МПа – в течение 70 ч; *е* – при 1000 °С и напряжении $\sigma = 65$ МПа – в течение 944 ч; *ж, з* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 60$ МПа – в течение 158 ч; *и* – при 1100 °С и напряжении $\sigma = 35$ МПа – в течение 1530 ч

В производственных условиях ООО «Точка плавления» по рекомендациям специалистов НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведена сборка годных восковых моделей сопловых лопаток в модельные блоки – по 4 шт. в блоке [39].

По серийному технологическому процессу проведено изготовление керамических форм, включающее послойное нанесение керамического покрытия на модельные блоки, последующую сушку слоев покрытия, удаление модельной массы и прокатку готовых форм в печи. Для отливки монокристаллических полуфабрикатов сопловых лопаток с регламентированной КГО, проведена установка монокристаллических затравок в затравочные карманы керамических форм и заделка их керамической суспензией.

При технологическом сопровождении специалистов института в промышленных производственных условиях ООО «Точка плавления» на вакуумной плавильно-заливочной установке по режимам, согласно технологической инструкции, проведено опробование разработанной технологии литья монокристаллических полуфабрикатов сопловых лопаток из литейного сплава. По результатам контроля макроструктуры стартовых конусов после заливки пяти плавов по две керамические формы в каждой плавке и контроля их кристаллографической ориентации установлено, что выход годного составляет 76 % по монокристаллической структуре и отклонениям от КГО [001] не более 10 градусов.

По результатам проведенных работ ООО «Точка плавления» выпущен Акт об опробовании.

После проведения термической обработки в соответствии с режимами технологической рекомендации отливки переданы в АО «ОДК-Климов». На полученных отливках сопловых лопаток после проведенной термической обработки, совмещенной с горячим изостатическим прессованием, в АО «ОДК-Климов» осуществлено травление и последующий контроль их макроструктуры, по результатам которого выявлено, что все отливки имеют монокристаллическую макроструктуру и соответствуют техническим требованиям по макроструктуре. Количественный анализ материала отливки сопловой лопатки, прошедшей полную термическую обработку, показал следующие результаты – при допустимой микропористости 0,1 % (по массе) поры составляют сотые доли процента (табл. 1) в четырех сечениях отливки, а именно: во входной (рис. 4, а) и выходной (рис. 4, б) кромках, в корыте (рис. 4, в) и спинке (рис. 4, г).

Таблица 1

Результаты количественного анализа пор в материале образцов из сплава ВИН4М, полученных в производственных условиях

Сечение отливки	Доля пор на 25 полях зрения при $\times 200$, %	Диаметр пор на 25 полях зрения, мкм	Длина пор на 25 полях зрения, мкм	Максимальная длина поры на 25 полях зрения, мкм
	среднее значение			
Входная кромка	0,03	3,5 $\pm$ 0,3	4,6 $\pm$ 0,3	50,4
Выходная кромка	0,01	2,6 $\pm$ 0,2	3,5 $\pm$ 0,3	17,7
Корыто	0,02	3,0 $\pm$ 0,1	4,1 $\pm$ 0,2	34,9
Спинка	0,03	3,1 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,2	41,8

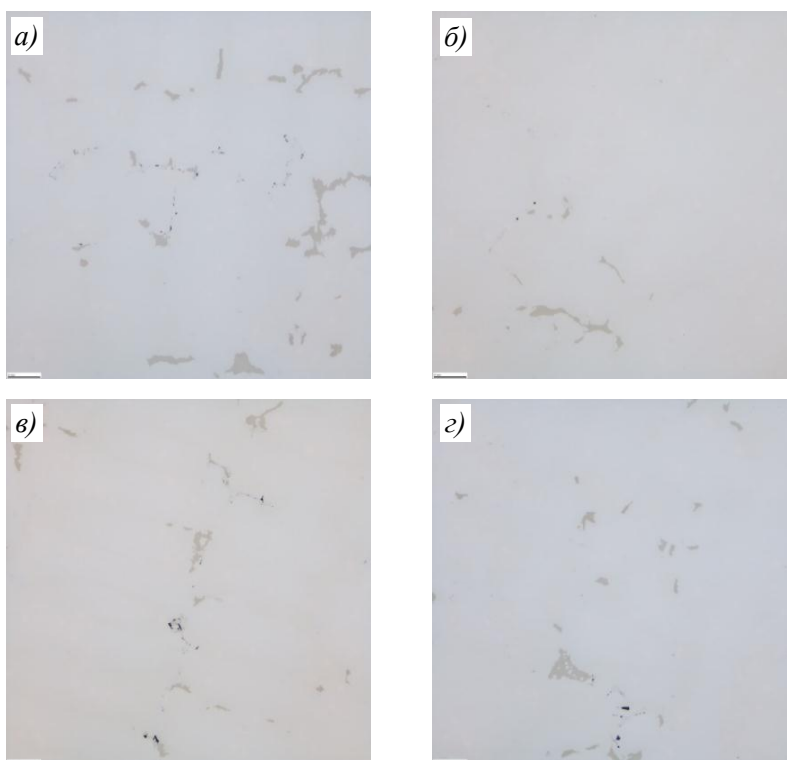


Рис. 4. Поля зрения с наибольшим количеством пор в монокристаллической отливке сопловой лопатки из сплава ВИН4М, прошедшей полную термическую обработку: а, б – входная и выходная кромки; в – корыто; з – спинка

В АО «ОДК-Климов» из литых и термообработанных заготовок сопловых лопаток сплава ВИН4М посредством механической обработки изготовлена партия сопловых лопаток турбины компрессора для нанесения покрытия и выпущен Акт об изготовлении партии. Полученная в результате механической обработки проточной части литых заготовок сопловых лопаток шероховатость поверхностей составила $R_a = 0,46\text{--}3,2$ (в среднем – $R_a = 2,5$), что соответствует установленным на предприятии нормам к значениям шероховатости поверхностей проточной части лопаток при их подготовке для нанесения покрытия (рис. 5).



Рис. 5. Сопловые лопатки из сплава ВИН4М-ВИ после механической обработки для нанесения покрытия

При отработке технологических параметров нанесения керамического слоя покрытия на сопловые лопатки (заготовки) из интерметаллидного сплава ВИН4М для обеспечения равномерности толщины и снижения скалывания варьировали ток дуги и дистанцию напыления. Критерием оценки равномерности толщины покрытия является среднеквадратичное отклонение толщины покрытия по выборке из четырех точек – входной и выходной кромкам пера отливки, корыту и спинке. Рассчитанное

по формуле минимальное значение среднеквадратичного отклонения соответствует наибольшей равномерности покрытия. Таким образом, разработана технология и выпущена технологическая инструкция на нанесение многослойного ТЗП на поверхность турбинной лопатки. Нанесено также жаростойкое покрытие на монокристаллические образцы и проведены сравнительные статические испытания с определением времени до разрушения при температурах 1150 и 1200 °С. По результатам испытаний посчитаны средние и минимальные значения жаропрочности сплава ВИН4М на образцах с покрытием и без покрытия (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения пределов длительной прочности образцов из сплава ВИН4М при различной выдержке

Температура испытания, °С	Наличие покрытия	σ_1	σ_5	σ_{10}	σ_{50}	σ_{100}	σ_{500}	σ_{1000}
		МПа						
1150	Без покрытия	–	–	–	–	53	35	28
	С покрытием	–	–	–	–	48	30	23
1200	Без покрытия	–	–	65	47	40	–	–
	С покрытием	–	–	60	43	37	–	–
1250	Без покрытия	63	47	40	–	–	–	–
	С покрытием	63	47	40	–	–	–	–

Минимальное снижение жаропрочности образцов из сплава ВИН4М с покрытием по сравнению с образцами без покрытия при температурах 1150, 1200 и 1250 °С на базах испытания: 1, 5 и 10 ч (при 1250 °С); на базах 10, 50 и 100 ч (при 1200 °С); на базах 100, 500 и 1000 ч (при 1150 °С) – можно объяснить сбалансированностью химического состава сплава, которая проявляется и после проведения полной термической обработки, и с диффузионным слоем жаростойкого покрытия (табл. 2).

Изменение структурно-фазового состава в процессе длительных испытаний монокристаллических образцов из сплава ВИН4М с КГО [001] с ТЗП и без покрытия исследовали методом растровой электронной микроскопии (рис. 6).

Исследование микроструктуры испытанных образцов выявило их дендритное строение, причем температурно-напряженное состояние рабочей части приводит к уширению прослоек γ -твердого раствора. В осях дендритов первого порядка толщина прослоек меньше, чем в междендритных участках (рис. 6, б, в, д, е, з, и, л, м, о, п, с, т). Во всех образцах присутствуют избыточные фазы различной формы (рис. 6, а, г, з, и, к, м, н, т). Обращают на себя внимание вторичные частицы γ' -фазы: с повышением температуры испытания с 1150 до 1200 °С они укрупняются, причем на образцах без покрытия в большей степени, чем на образцах с покрытием. В прослойках γ -твердого раствора в осях дендритов первого порядка вторичные частицы γ' -фазы имеют форму, близкую к кубической, а в междендритных участках – они неправильной формы (рис. 6, б, в, д, е, з, и, л, м). Образцы, испытанные при 1250 °С, с покрытием и без покрытия в осях первого порядка и междендритных областях имеют вторичные частицы γ' -фазы неправильной формы и приблизительно одинакового размера (рис. 6, о, п, с, т).

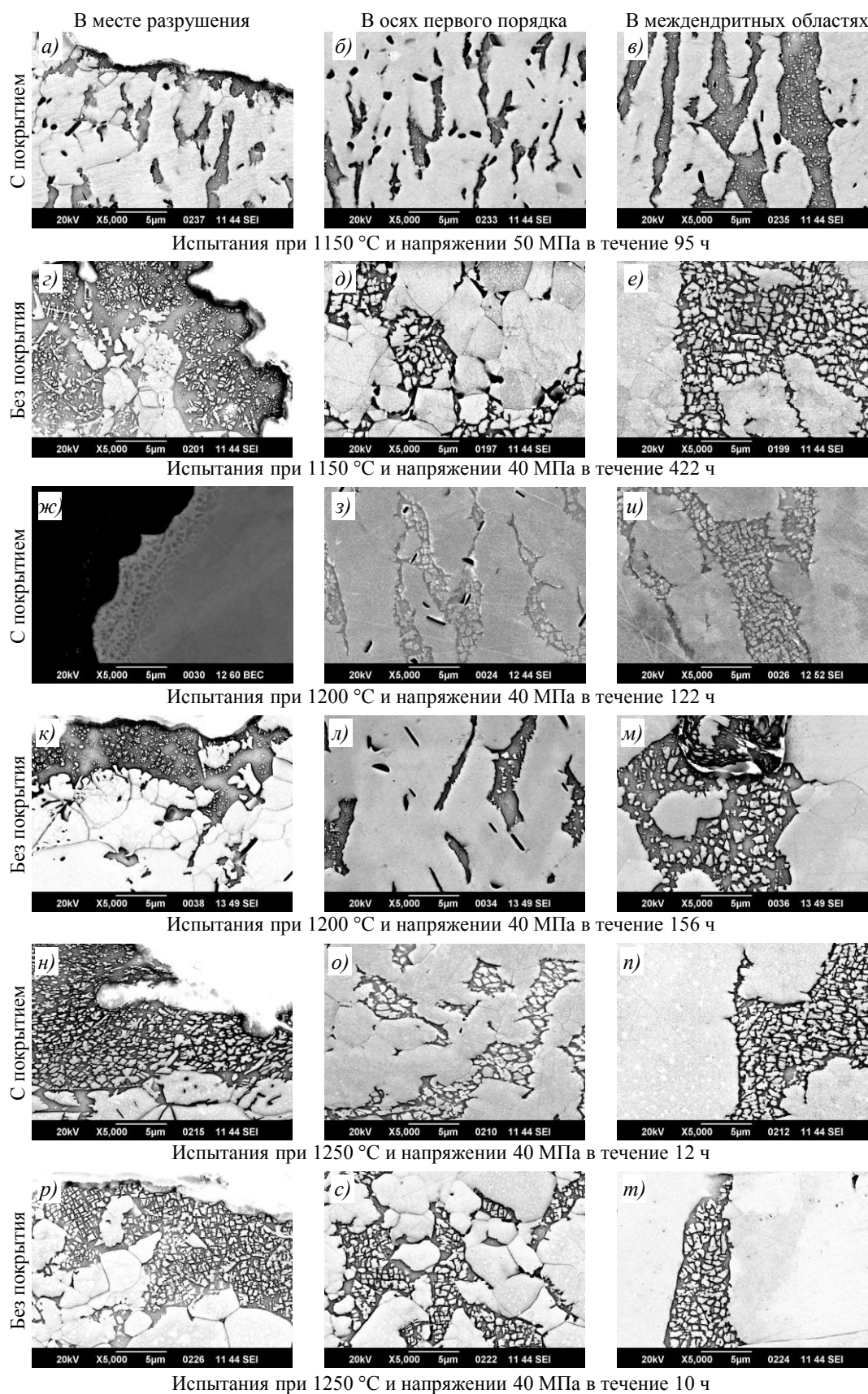


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 5000$) рабочей части образцов из сплава ВИН4М

Заключения

Проведенные микроструктурные исследования монокристаллических образцов из конструкционного сплава ВИН4М в литом состоянии с регламентированной КГО [001] после полной термической обработки, фрактографическое исследование образцов, прошедших длительные статические испытания при различных температурах и напряжениях, а также разработанные и опробованные в промышленных условиях технологии отливки, термической обработки, горячего изостатического прессования, нанесения многослойного ТЗП на поверхность лопатки соплового аппарата из сплава ВИН4М показывают перспективность применения литейного интерметаллидного сплава ВИН4М-ВИ с ТПЗ для сопловых лопаток турбины компрессора вертолетного двигателя с рабочей температурой деталей до 1150 °С, с забросами до 1200 °С [40].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.5. «Направленная кристаллизация (с переменным управляемым градиентом) высокотемпературных жаропрочных сплавов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: А.В. Горюнову, под руководством которого выплавлен сплав ВИН4М-ВИ; Н.И. Артеменко, под руководством которого на образцы и отливки сопловых лопаток нанесены жаростойкие и теплозащитные покрытия; А.Н. Раевских, который провел исследования методом растровой электронной микроскопии микроструктуры образцов из сплава ВИН4М-ВИ после испытаний на длительную прочность.

Список источников

1. Зайнуллин Р.И., Ганеев А.А., Шахов Р.В. и др. Микроструктура и механические свойства на сжатие при температурах 1000–1200 °С жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием γ' -образующих элементов // Письма о материалах. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 381–386.
2. Зайцев Н.А., Логунов А.В., Самойленко В.М., Шатульский А.А. Прогнозирование ресурса комплекса «жаропрочный сплав – жаростойкое покрытие» на основе оценки структурной стабильности // Вестник Московского государственного открытого университета. Сер.: Техника и технология. 2012. № 2 (8). С. 5–17.
3. Зайцев Н.А., Логунов А.В., Шатульский А.А., Шмотин Ю.Н. Определение коэффициентов диффузии легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах // Технология металлов. 2011. № 10. С. 38–46.
4. Михайлов А.М., Логунов А.В., Данилов Д.В. Обеспечение повышенного качества жаропрочных никелевых сплавов путем уменьшения допустимого интервала разброса легирующих элементов // Технология металлов. 2024. № 2. С. 30–37.
5. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
6. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Чабина Е.Б., Петрушин Н.В., Филонова Е.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н. Эволюция структуры и фазового состава материала рабочей лопатки из сплава ЖС32 в результате воздействия эксплуатационных факторов // Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 85–97.

8. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Бунтушкин В.П. и др. Термостабильность структуры сплава на основе Ni_3Al и его применение в рабочих лопатках малоразмерных ГТД // *Металлы*. 2003. № 3. С. 90–100.
9. Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением. М.: МИСИС, 2008. 327 с.
10. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
11. Шевцова Л.И. Исследование сплава ВКНА-1В, полученного методом SLS с предварительной механической активацией порошков // *Металлург*. 2023. № 8. С. 63–70.
12. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и TiAl : микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург, 2002. 359 с.
13. Verhoeven J.D., Lee J.H., Laabs F.C., Jones L.L. The phase equilibria of Ni_3Al evaluated by directional solidification and diffusion couple experiment // *Journal Phase Equilibrium*. 1991. Vol. 12. No. 1. P. 15–23.
14. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni_3Al Based Intermetallic alloys – Current Stage and Potential Perceptivities // *Materials*. 2015. No. 8. P. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
15. Yao Y., Xing C., Peng H. Solidification microstructure and tensile deformation mechanisms of selective electron beam melted Ni_3Al -based alloy at room and elevated temperatures // *Materials Science & Engineering A*. 2021. Vol. 802. P. 16–25. DOI: 10.1016/j.msea.2020/140629.
16. Zhao Y., Chang Y., Li X. et al. P phase precipitation and strengthening behavior of a novel polycrystalline Ni_3Al -based intermetallic alloy at 1100 °C // *Acta Materialia*. 2023. Vol. 12. P. 1–32. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119601.
17. Elliot A.J., Karney G.B., Pollock T.M., Gigliotti M.F.X. Issue in Processing by the Liquid-Sn Assisted Directional Solidification Technique // *Superalloys*. Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 421–445.
18. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Колодяжный М.Ю., Нарский А.Р. Влияние условий направленной кристаллизации и размера лопаток ГТД на особенности дендритной структуры никелевых жаропрочных сплавов // *Электromеталлургия*. 2023. № 4. С. 2–9. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-4-2-9.
19. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Направленная кристаллизация жаропрочного сплава с переменным управляемым градиентом // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 3 (87). С. 50–58.
20. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Взгляд на историю развития и современные исследования процесса направленной кристаллизации литейных жаропрочных сплавов с управляемым градиентом на фронте роста // *Электromеталлургия*. 2018. № 7. С. 33–40. DOI: 10.31044/1684-5781-2018-0-7-33-40.
21. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. и др. Развитие технологии и оборудования для получения лопаток горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией и монокристаллической структурой // *Электromеталлургия*. 2023. № 7. С. 3–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-7-3-11.
22. Толорайя В.Н., Остроухова Г.А. Получение монокристалльных затравок [001] из сплавов системы Ni–W методом направленной кристаллизации // *Вопросы материаловедения*. 2021. № 2 (196). С. 55–65.
23. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Карачевцев Ф.Н., Назаркин Р.М. Структура и жаропрочность интерметаллидного ренийсодержащего сплава после термической обработки // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Сер.: Машиностроение*. 2019. № 6 (129). С. 17–31.
24. Артеменко Н.И., Татарников С.В., Доронин О.Н. Исследование влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия ZrO_2 –7 % Y_2O_3 методом плазменного напыления на производительность технологического процесса // *Труды ВИАМ*. 2023. № 4 (122). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.

25. Будиновский С.А., Горлов Д.С., Бенклян А.С. Нанесение защитных ионно-плазменных покрытий на крупногабаритные детали на установках типа МАП // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
26. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al и изделие, выполненное из него: пат. 2588949 Рос. Федерация; заявл. 01.04.15; опубл. 10.07.16.
27. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Основные принципы легирования интерметаллида Ni_3Al при создании высокотемпературных сплавов // *Материаловедение*. 1998. № 7. С. 13–15.
28. Кишкин С.Т., Морозова Г.И. Особенности метода физико-химического фазового анализа современных жаропрочных никелевых сплавов // *Вопросы авиационной науки и техники*. Сер.: Авиационные материалы. М., 1987. С. 86–93.
29. Каблов Е.Н., Кишкин С.Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД // *Газотурбинные технологии*. 2002. № 1 (16). С. 34–37.
30. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 12. С. 52–58.
31. Базылева О.А., Римша Э.Г., Чабина Е.Б., Раевских А.Н. Некоторые аспекты создания и исследования конструкционных литейных интерметаллидных сплавов для перспективных вертолетных двигателей // *Труды ВИАМ*. 2024. № 3 (133). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.
32. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин Д.Е. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2016. 368 с.
33. Петров Д.Н., Гарибов Г.С., Авдюхин С.П. и др. Особенности формирования плотной структуры литой прутковой заготовки // *Технология легких сплавов*. 2006. № 4. С. 57–60.
34. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Раевских А.Н., Тренингов И.А. Высокоградиентная направленная кристаллизация интерметаллидного сплава на основе Ni_3Al системы $Ni-Al-Ta$, упрочненного фазой TaC // *Труды ВИАМ*. 2017. № 3 (51). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1.
35. Раевских А.Н. Применение цифровых технологий для выявления неоднородных концентрационных зон в структуре жаропрочных никелевых сплавов, в том числе полученных селективным лазерным спеканием // *Вопросы материаловедения*. 2020. № 4 (104). С. 32–47.
36. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Чабина Е.Б. и др. Исследование структурно-фазовых превращений в литейном конструкционном сплаве на основе интерметаллида Ni_3Al после высокотемпературных выдержек и в процессе наработки сплава в качестве сопловой лопатки // *Вопросы материаловедения*. 2023. № 2. С. 60–70.
37. Морозова Л.В. Фрактографический анализ эксплуатационных разрушений конических зубчатых колес с центрального привода авиационных газотурбинных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 22 с.
38. Нарский А.Р. Из истории отечественного авиационного материаловедения. Отдел испытания авиационных материалов ЦАГИ в архивных документах (1925–1933 гг.) // *История науки и техники*. 2013. № 9. С. 44–52.
39. Рассохина Л.И., Парфенович П.И., Нарский А.Р. Проблемы создания модельных композиций нового поколения на базе отечественных материалов для изготовления лопаток ГТД // *Новости материаловедения*. Наука и техника. 2015. № 3 (15). Ст. 07. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 24.05.2024).
40. Логунов А.В. *Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин*. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2017. 852 с.

References

1. Zaynullin R.I., Ganeev A.A., Shakhov R.V. et al. Microstructure and mechanical properties in compression at temperatures of 1000–1200 °C of heat-resistant nickel alloys with a high content of γ' -forming elements. *Pisma o materialakh*, 2020, vol. 10, no. 4 (40), pp. 381–386.

2. Zaitsev N.A., Logunov A.V., Samoylenko V.M., Shatul'sky A.A. Forecasting the resource of the «heat-resistant alloy – heat-resistant coating» complex based on an assessment of structural stability. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. Ser.: Tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 2 (8), pp. 5–17.
3. Zaitsev N.A., Logunov A.V., Shatul'sky A.A., Shmotin Yu.N. Determination of diffusion coefficients of alloying elements in heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya metallov*, 2011, no. 10, pp. 38–46.
4. Mikhailov A.M., Logunov A.V., Danilov D.V. Ensuring improved quality of heat-resistant nickel alloys by reducing the permissible range of dispersion of alloying elements. *Tekhnologiya metallov*, 2024, no. 2, pp. 30–37.
5. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
6. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaew M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
7. Chabina E.B., Petrushin N.V., Filonova E.V., Elyutin E.S., Raevskikh A.N. Evolution of the structure and phase composition of the material of the working blade made of ZhS32 alloy as a result of the impact of operational factors. *New materials and technologies for deep processing of raw materials - the basis for innovative development of the Russian economy: Proc. III Int. scientific-technical. conf. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM*, 2022, pp. 85–97.
8. Povarova K.B., Kazanskaya N.K., Buntushkin V.P. et al. Thermal stability of the structure of the alloy based on Ni₃Al and its application in the working blades of small-sized gas turbine engines. *Metally*, 2003, no. 3, pp. 90–100.
9. Kolobov Yu.R., Kablov E.N., Kozlov E.V. et al. *Structure and properties of intermetallic materials with nanophase strengthening*. Moscow: MISIS, 2008, 327 p.
10. Nochovnaya N.A., Bazyleva O.A., Kablov D.E., Panin P.V. *Intermetallic alloys based on titanium and nickel*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 308 p.
11. Shevtsova L.I. Study of VKNA-1V alloy obtained by SLS with preliminary mechanical activation of powders. *Metallurg*, 2023, no. 8, pp. 63–70.
12. Grinberg B.A., Ivanov M.A. *Intermetallics Ni₃Al and TiAl: microstructure, deformation behavior*. Ekaterinburg, 2002, 359 p.
13. Verhoeven J.D., Lee J.H., Laabs F.C., Jones L.L. The phase equilibria of Ni₃Al evaluated by directional solidification and diffusion couple experiment. *Journal Phase Equilibrium*, 1991, vol. 12, no. 1, pp. 15–23.
14. Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al Based Intermetallic alloys – Current Stage and Potential Perceptivities. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 2537–2568. DOI: 10.3390/ma8052537.
15. Yao Y., Xing C., Peng H. Solidification microstructure and tensile deformation mechanisms of selective electron beam melted Ni₃Al-based alloy at room and elevated temperatures. *Materials Science & Engineering A*, 2021, vol. 802, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.msea/2020/140629.
16. Zhao Y., Chang Y., Li X. et al. P phase precipitation and strengthening behavior of a novel polycrystalline Ni₃Al-based intermetallic alloy at 1100 °C. *Acta Materialia*, 2023, vol. 12, pp. 1–32. DOI: 10.1016/j.actamat.2023.119601.
17. Elliot A.J., Karney G.B., Pollock T.M., Gigliotti M.F.X. Issue in Processing by the Liquid-Sn Assisted Directional Solidification Technique. *Superalloys. Minerals, Metals & Materials Society*, 2004, pp. 421–445.
18. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Kolodyazhny M.Yu., Narskiy A.R. Effect of directional solidification conditions and GTE blade size on the features of the dendritic structure of nickel-based heat-resistant alloys. *Electrometallurgiya*, 2023, no. 4, pp. 2–9. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-4-2-9.

19. Bondarenko Yu.A., Echin A.B. Directional solidification of a heat-resistant alloy with a variable controlled gradient. *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, no. 3 (87), pp. 50–58.
20. Bondarenko Yu.A., Echin A.B. A look at the history of development and modern research of the process of directional solidification of cast heat-resistant alloys with a controlled gradient at the growth front. *Elektrometallurgiya*, 2018, no. 7, pp. 33–40. DOI: 10.31044/1684-5781-2018-0-7-33-40.
21. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A. et al. Development of technology and equipment for producing hot path blades of gas turbine engines from heat-resistant alloys with directional solidification and single-crystal structure. *Elektrometallurgiya*, 2023, no. 7, pp. 3–11. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-7-3-11.
22. Toloraya V.N., Ostroukhova G.A. Obtaining single-crystal [001] seeds from Ni–W system alloys by directional crystallization. *Voprosy Materialovedeniya*, 2021, no. 2 (196), pp. 55–65.
23. Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Karachevtsev F.N., Nazarkin R.M. Structure and heat resistance of intermetallic rhenium-containing alloy after heat treatment. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana, Ser.: Mashinostroyeniye*, 2019, no. 6 (129), pp. 17–31.
24. Artemenko N.I., Tatarnikov S.V., Doronin O.N. Investigation of the influence of the parameters of applying the ceramic layer of the ZrO_2 –7 % Y_2O_3 heat-shielding coating by plasma spraying on the productivity of the technological process. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.
25. Budinovskiy S.A., Gorlov D.S., Benklyan A.S. Deposition of protective ion-plasma coatings on largescale parts on MAP type installations. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-101-110.
26. Alloy based on the intermetallic compound Ni_3Al and a product made from it: pat. 2588949 Rus. Federation; appl. 01.04.15; publ. 10.07.16.
27. Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A., Morozova G.I. Basic principles of alloying the intermetallic compound Ni_3Al when creating high-temperature alloys. *Materialovedenie*, 1998, no. 7, pp. 13–15.
28. Kishkin S.T., Morozova G.I. Features of the method of physicochemical phase analysis of modern heat-resistant nickel alloys. *Voprosy aviatsionnoy nauki i tekhniki. Ser.: Aviatsionnye materialy*. Moscow, 1987, pp. 86–93.
29. Kablov E.N., Kishkin S.T. Prospects for the use of cast heat-resistant alloys for the production of turbine blades for gas turbine engines. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, 2002, no. 1 (16), pp. 34–37.
30. Morozova G.I. Compensation for the imbalance of alloying heat-resistant nickel alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 12, pp. 52–58.
31. Bazyleva O.A., Rimsha E.G., Chabina E.B., Raevskikh A.N. Some aspects of creation and research of structural casting intermetallide alloys for promising helicopter engines. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 24, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-3-17.
32. Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin D.E. *Metallurgy of cast heat-resistant alloys: technology and equipment*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2016, 368 p.
33. Petrov D.N., Garibov G.S., Avdyukhin S.P. et al. Features of the formation of a dense structure of a cast rod blank. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2006, no. 4, pp. 57–60.
34. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Raevskikh A.N., Treninkov I.A. High-gradient directional solidification of intermetallic Ni–Al–Ta alloy based on Ni_3Al , strengthened by TaC-phase. *Trudy VIAM*, 2017, no. 3 (51), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-1-1.
35. Raevskikh A.N. Application of digital technologies for identifying inhomogeneous concentration zones in the structure of heat-resistant nickel alloys, including those obtained by selective laser sintering. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 4 (104), pp. 32–47.

36. Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Chabina E.B. et al. Study of structural and phase transformations in a casting structural alloy based on the intermetallic compound Ni_3Al after high-temperature holding and during the production of the alloy as a nozzle blade. *Voprosy materialovedeniya*, 2023, vol. 114, no. 2, pp. 60–70.
37. Morozova L.V. *Fractographic analysis of operational failures of bevel gears from the central drive of aircraft gas turbine engines*: abstract thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 22 p.
38. Narsky A.R. From the history of domestic aviation materials science. Department of testing of aviation materials of TsAGI in archival documents (1925–1933). *Istoriya nauki i tekhniki*, 2013, no. 9, pp. 44–52.
39. Rassokhina L.I., Parfenovich P.I., Narsky A.R. Problems of creating a new generation of model compositions based on domestic materials for the manufacture of gas turbine engine blades. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 3 (15), art. 07. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed: May 24, 2024).
40. Logunov A.V. *Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines*. Rybinsk: Gazoturbinnyye tekhnologii, 2017, 852 p.

Информация об авторах

Базылева Ольга Анатольевна, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Висик Елена Михайловна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонская Наталья Александровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga A. Bazyleva, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 08.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.08.2024.
The article was submitted 08.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.08.2024.

Научная статья

УДК 669.017.13

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Ni–Co–Cr ЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ

И.И. Власов¹, Г.С. Севальнев¹, А.А. Ляхов¹, Д.Ю. Нефедкин¹

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

Аннотация. Проведены исследования микроструктуры, фазового состава, а также изменение механических свойств в зависимости от температуры испытания высоко-энтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiReC после вакуумной индукционной выплавки. По результатам исследований и испытаний установлено, что структура сплава состоит из гранецентрированного кубического твердого раствора с избыточными фазами, с реализацией механизма деформационного упрочнения при температуре испытания 20 °C и структурно-фазовыми превращениями в интервале температур 900–1100 °C.

Ключевые слова: энтропийные сплавы, легирование, структура, фазовый состав, твердость, механические свойства

Для цитирования: Власов И.И., Севальнев Г.С., Ляхов А.А., Нефедкин Д.Ю. Исследование структуры и механических свойств Ni–Co–Cr энтропийного сплава в литом состоянии // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.

Scientific article

STUDY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ni–Co–Cr ENTROPY ALLOY IN THE CAST STATE

I.I. Vlasov¹, G.S. Sevalnev¹, A.A. Lyahov¹, D.Yu. Nefedkin¹

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 article were studied the microstructure, phase composition, and the change in mechanical properties depending on the test temperature of the high-entropy alloy in the NiCoCrWNbAlTiReC system after vacuum induction melting. According to the results of the studies and tests, it was established that the alloy structure consists of a FCC solid solution with excess phases, with the implementation of the mechanism of strain hardening at the test temperature of 20 °C and structural-phase transformations in the temperature range of 900–1100 °C.

Keywords: entropy alloys, alloying, structure, phase composition, hardness, mechanical properties

For citation: Vlasov I.I., Sevalnev G.S., Lyahov A.A., Nefedkin D.Yu. Study of the structure and mechanical properties of Ni–Co–Cr entropy alloy in the cast state. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-18-30.

Введение

В последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к разработке и исследованию новых материалов, которые благодаря формируемой структуре могут обеспечить уникальный комплекс физико-механических характеристик [1–5]. Одним из наиболее перспективных направлений является разработка и исследование энтропийных сплавов или сплавов с высокой энтропией смешения [6–10]. Эти новые материалы перспективны для реализации в современном материаловедении, что предполагает уникальные комбинации физико-механических свойств, которые делают их чрезвычайно важными для решения различных инженерных и технологических задач.

Высоко энтропийные сплавы – это многокомпонентные системы, в которых пять или более элементов смешивают в равных (или близких к равным) молярных соотношениях, что приводит к формированию простых кристаллических структур, типичных для чистых металлов или однородных сплавов с основным матричным компонентом. Высокая энтропия смешения в этих системах способствует образованию твердых растворов без значительного образования избыточных фаз и интерметаллидных соединений, что является ключевым фактором, определяющим их уникальные свойства [11–15].

Высокоэнтропийные сплавы демонстрируют достаточно высокую прочность наряду с высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью (рис. 1), что делает их перспективными материалами для использования в экстремальных условиях, таких как высокие температуры, агрессивные среды и высоконагруженные состояния [16]. Кроме того, тонкое регулирование состава и микроструктуры этих сплавов позволяет получать их свойства для конкретного применения, что еще больше расширяет возможности для потенциального использования.

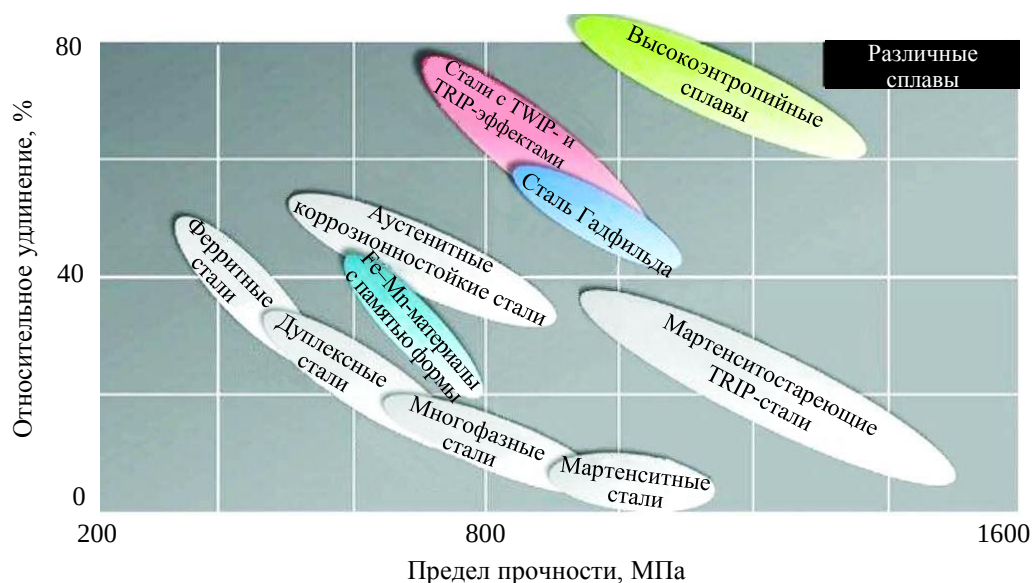


Рис. 1. Соотношение относительного удлинения и предела прочности в различных сталях и высокоэнтропийных сплавах [16]

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в понимании свойств и поведения энтропийных сплавов, ряд фундаментальных вопросов и практических задач остаются нерешенными. В частности, более глубокое понимание взаимосвязи между составом, микроструктурой и свойствами этих материалов имеет решающее значение для их дальнейшего совершенствования и целенаправленного использования в конкретных узлах агрегатов машиностроительной отрасли.

В настоящее время за рубежом активно развивается направление по разработке и применению энтропийных сплавов для изготовления деталей, работающих при температурах >1000 °С. Одним из таких примеров является новый высокоэнтропийный сплав марки GRX-810 [16–18], который обеспечивает более высокие характеристики прочности и ползучести при температуре 1093 °С в сравнении с современными жаропрочными оксидно-упрочняемыми сплавами. Основное направление применения данного сплава – производство деталей методами аддитивных технологий для обеспечения равномерной структуры с высоким комплексом физико-механических характеристик и термической стабильности.

В данной работе проведены исследования структуры и механических свойств высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC при испытании в условиях высоких температур.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали высокоэнтропийный сплав системы NiCoCrWNbAlTiReC. Содержание Ni, Co и Cr реализовано в эквиатомном состоянии, остальные компоненты присутствуют в качестве легирующих элементов. Общее содержание легирующих элементов для данного сплава составляет ~5 % (по массе). Выплавку слитков проводили в вакуумно-индукционной печи при нагреве в интервале температур 1500–1600 °С. Разлив жидкого расплава после выдержки при температуре расплавления производили в стальные трубы, температура которых соответствовала температуре окружающей среды. Масса полученного слитка после выплавки составила 17 кг. Для оценки изменения структуры и свойств, часть полученных заготовок подвергнута горячей деформации для получения квадратных прутков со стороной квадрата 30 мм. Степень обжатия заготовки и температурный интервал горячей деформации подбирали опытным путем.

Металлографический анализ структур высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC после выплавки и горячей деформации проводили методами световой микроскопии на оптическом конфокальном инвертированном микроскопе при увеличении $\times 50$ и электронной микроскопии в режиме вторичных и обратноотраженных электронов с использованием сканирующего электронного микроскопа при увеличениях $\times (500–1000)$. Анализ распределения легирующих элементов проводили с использованием приставки для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) методом энергодисперсионного картирования при ускоряющем напряжении 15 кВ, расшифровку дифрактограмм – с использованием встроенного программного обеспечения.

Стехиометрический состав частиц оценивали по МРСА с применением формулы

$$\frac{Me_{ат}}{C_{ат}(N_{ат})} = \frac{\% Me_i / A_i}{\% C(\% N) / A_C(A_N)},$$

где $\% Me_i$ – содержание элемента в карбиде (нитриде), % (по массе); A_i – атомная масса i -го элемента; $\% C(\% N)$ – содержание углерода (азота) в карбиде (нитриде), % (по массе); $A_C(A_N)$ – атомная масса углерода (азота).

Идентификацию соединения и стехиометрического состава анализировали в соответствии с открытой базой данных по существованию химических соединений при нормальных условиях [19].

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

Рентгеновскую съемку для определения фазового состава энтропийного сплава выполняли на дифрактометре с вертикально расположенным гониометром высокого разрешения модульной конструкции в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Расшифровку дифрактограмм проводили с применением встроенного программного обеспечения по общепринятым методикам.

Твердость полученных заготовок после выплавки и горячей деформации измеряли по методу Виккерса при нагрузке 1 кг (10 Н) в соответствии с ГОСТ 2999–75.

Механические свойства сплавов при комнатной температуре определяли на образцах, полученных из литых и горячедеформированных заготовок, в соответствии с ГОСТ 1497–84. Для определения механических свойств путем статического растяжения при повышенных температурах в интервале от 900 до 1200 °С использовали образцы, вырезанные из заготовок, в соответствии с ГОСТ 9651–84. Определение предела длительной прочности образцов сплавов проводили по ГОСТ 10145–81.

Для оценки степени деформационного упрочнения высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC использовали модель Джонсона-Кука [20, 21]:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})) \cdot (1 - (\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0})^m),$$

где σ – напряжение материала, МПа; A – предел текучести материала, МПа; B – коэффициент упругости материала, характеризующий его способность сопротивляться деформации, МПа; C – коэффициент вязкости материала, характеризующий его поведение при высоких скоростях деформации, МПа; m – показатель степени скорости деформации, характеризующий ее влияние на поведение материала; n – показатель степени упругости материала, характеризующий его поведение при больших деформациях; T_{melt} , T_0 , T – температуры плавления материала, окружающей среды и материала соответственно, К; ε – эффективная пластическая деформация; $\varepsilon/\varepsilon_0$ – эффективная скорость пластической деформации.

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

Результаты и обсуждение

Металлографический анализ высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiRe позволил установить, что в нем формируется типичная разнотернистая дендритная структура. По телу зерна сформирована гомогенная структура, по границам зерен образовались избыточные фазы (рис. 2). Изображение, полученное методом электронной микроскопии, показало, что в теле зерна образуются единичные избыточные фазы элементов с большой атомной массой, в то время как на границе реализуется сетка из таких фаз (рис. 3).

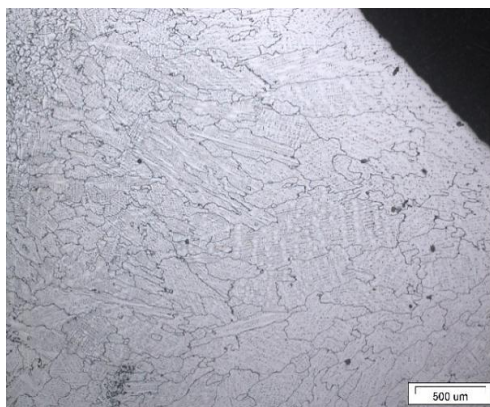


Рис. 2. Микроструктура ($\times 50$) энтропийного сплава системы NiCoCrWNbAlTiRe после выплавки

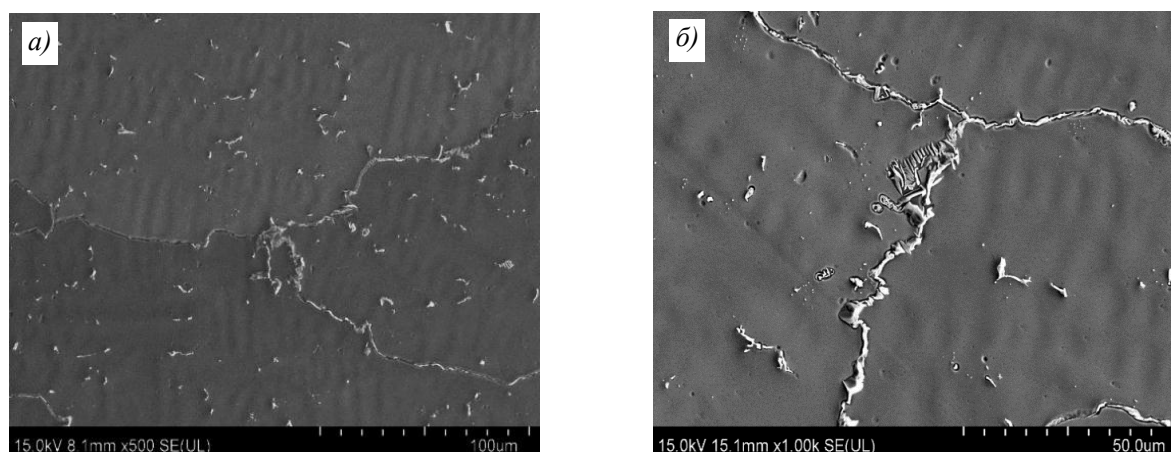


Рис. 3. Изображение структуры (*а* – $\times 500$; *б* – $\times 1000$) во вторичных электронах высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe

По результатам энергодисперсионного картирования участка стыка границ зерен установлено (рис. 4), что распределение основных элементов системы Ni–Co–Cr в структуре произошло равномерно без химического взаимодействия с другими компонентами. Избыточными фазами в теле и по границам зерен в данном случае являются комплексные карбиды (Nb, Ti)C (рис. 5).

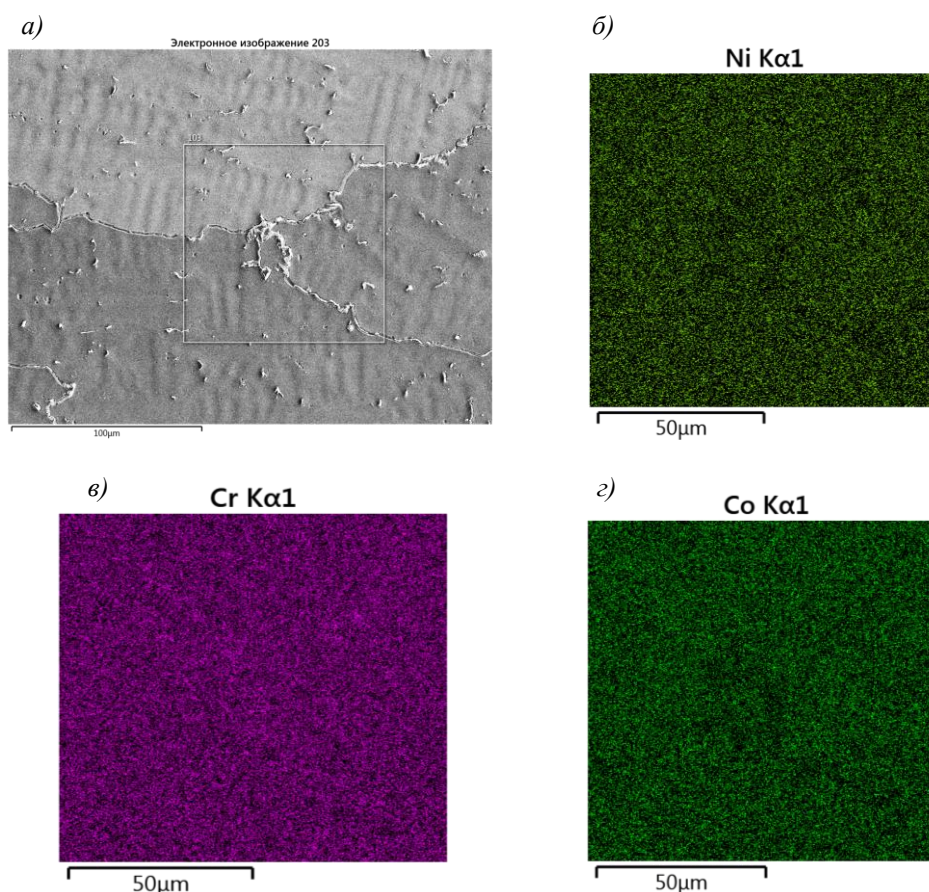


Рис. 4. Электронное изображение микроstructures энтропийного сплава на базе системы легирования NiCoCrWNbAlTiCRe (*а* – $\times 500$) и энергодисперсионные карты элементов: *б* – Ni; *в* – Cr; *г* – Co

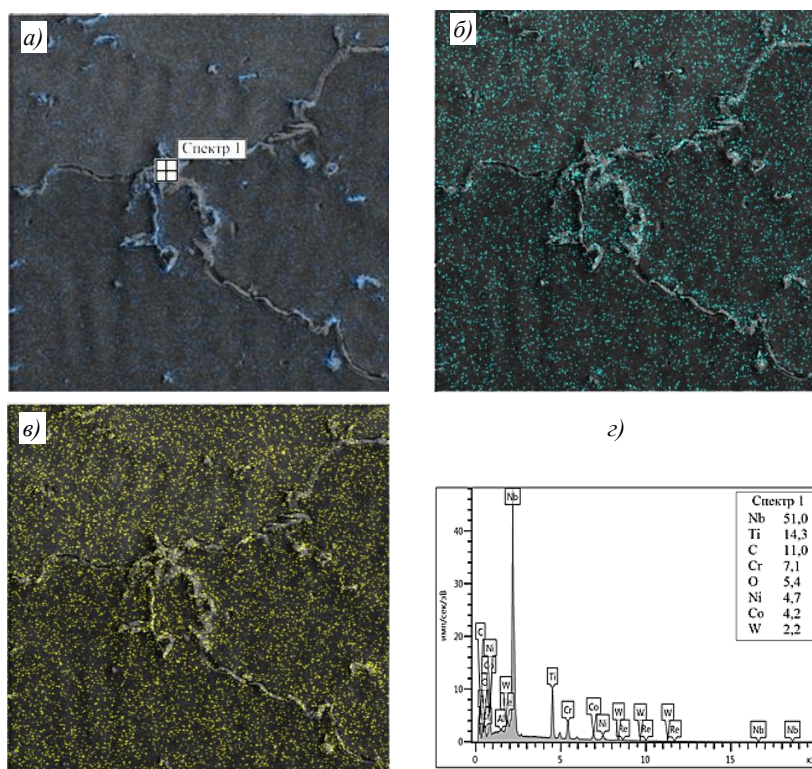


Рис. 5. Элементное энергодисперсионное картирование участка структуры по элементам С (а), Nb (б), Ti (в) и характеристическое рентгеновское излучение спектра комплексного карбида (Nb, Ti)C

Помимо комплексных карбидов ниобия, рентгенофазовым анализом дополнительно зафиксированы карбиды на основе вольфрама WC (рис. 6). Основными рефлексами на дифрактограмме являются рефлексы гранецентрированного кубического (ГЦК) твердого раствора, а также с низкой интенсивностью зафиксированы карбиды (Nb, Ti)C и WC. Для подтверждения наличия данных карбидов в структуре высокоэнтропийного сплава дополнительно проведена просвечивающая электронная микроскопия, которая подтвердила наличие избыточной фазы, содержащей вольфрам, однако наибольшую долю в данном соединении составляет хром (рис. 7). В соответствии с базой существования химических соединений в данном случае это, предположительно, может быть соединение $\text{Cr}_{22}\text{WC}_6$.

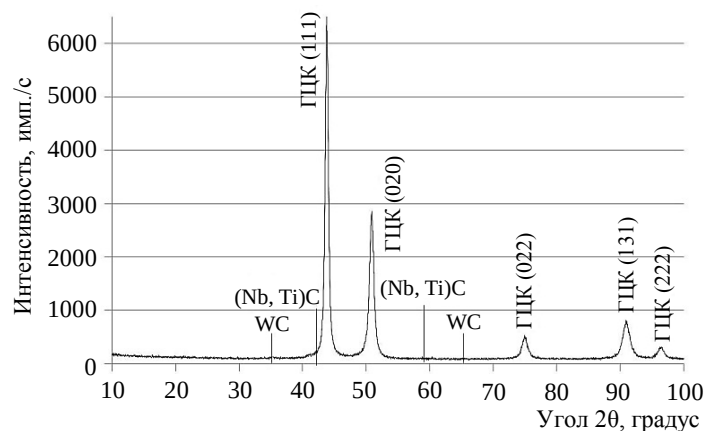


Рис. 6. Дифрактограмма высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe

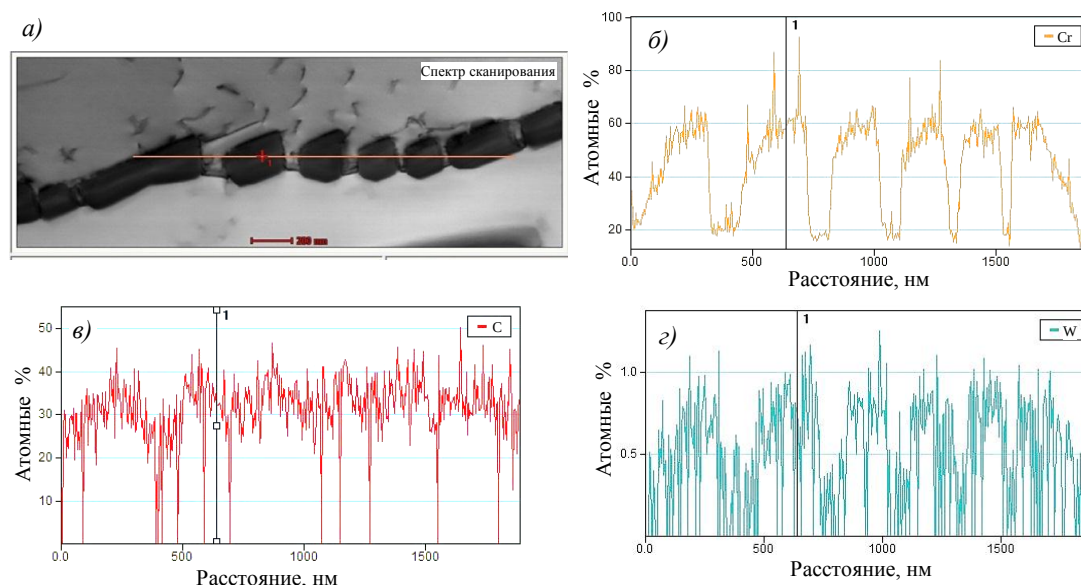


Рис. 7. Исследуемый методом просвечивающей электронной микроскопии участок структуры высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe (a) и характеристические спектры излучения элементов Cr (б), C (в) и W (г)

Диаграммы после испытаний на статическое растяжение при различных температурах высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe представлены на рис. 8. Характер формирования кривой растяжения при температуре испытания 20 °C (рис. 8, а) аналогичен кривой растяжения комплексно-легированных сталей, обладающих TRIP-эффектом – в результате деформации происходит упрочнение за счет сдвигового ($\gamma \rightarrow \alpha'$)-превращения, а также за счет механизма двойникования и реализации высокого уровня пластических характеристик [22, 23]. При последующем увеличении температуры до 900–1100 °C данный эффект отсутствует, однако при температурах 1000 и 1100 °C образуется зуб текучести (рис. 8, б), что свидетельствует о перераспределении дислокаций и активном протекании структурно-фазовых превращений.

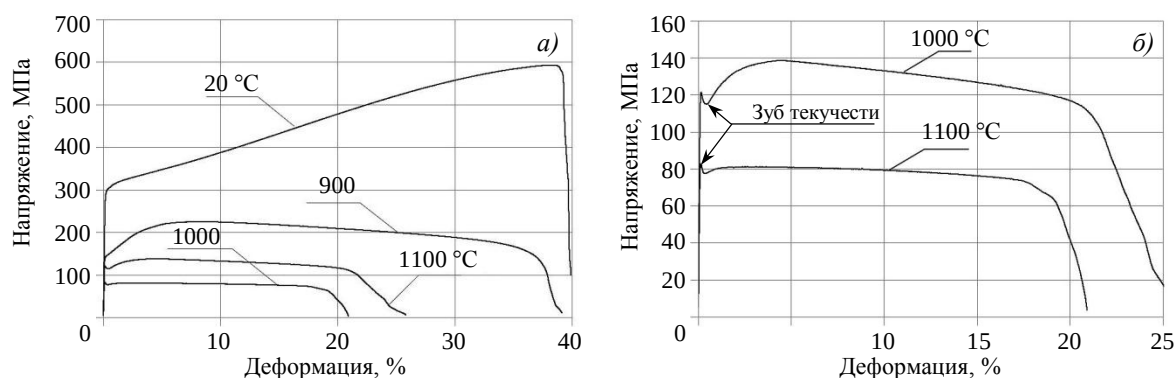


Рис. 8. Диаграммы растяжения образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCRe при температурах 20, 900, 1000 и 1100 °C (a) и 1000 и 1100 °C (б)

Анализ изменения механических свойств при различных температурах испытаний показал типичное снижение механических свойств при увеличении температуры (рис. 9, а, б), однако после температуры 1000 °C происходит практически линейное снижение предела прочности и предела текучести со значительным уменьшением

удлинения – с 48 до 32 % (рис. 9, в), что характерно для процесса ускоренного накопления дислокаций при деформации. Исследования изменения твердости образцов (рис. 9, г) после испытаний косвенно подтвердили, что в температурном диапазоне 900–1000 °С происходят структурно-фазовые изменения с выделением фаз и последующим их растворением при температуре 1100 °С.

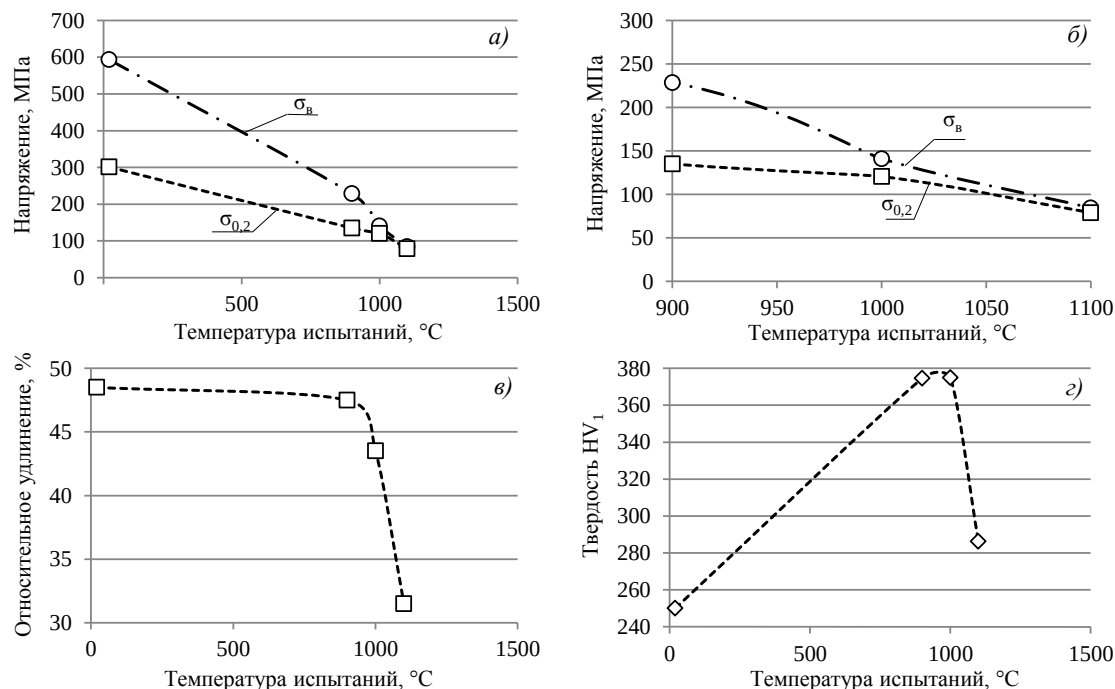


Рис. 9. Изменение механических свойств σ_B и $\sigma_{0.2}$ (а, б), δ (в), HV_1 (г) при различных температурах испытаний образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe

Для обеспечения высокой работоспособности изделия при высоких температурах жаропрочный сплав должен обладать высокой длительной прочностью, в связи с чем проведены испытания высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC при температуре 1100 °С с изменением прикладываемого напряжения (рис. 10). По результатам испытаний установлено, что при напряжениях 40 и 50 МПа разрушение образца наступает через 25 мин испытания. Снижение напряжения до 30 МПа увеличивает время до разрушения до 4 ч, а уменьшение до 20 МПа привело к значительному увеличению времени до разрушения, в результате чего сплав выстоял 48 ч. В конечном итоге базу испытаний 100 ч выдержал сплав при напряжении 10 МПа и был снят без разрушения.

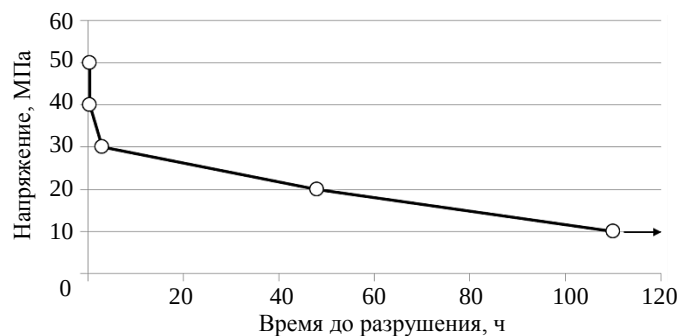


Рис. 10. Зависимость времени до разрушения от прикладываемого напряжения при температуре испытания 1100 °С образцов из высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiCrRe

В соответствии с моделью Джонсона-Кука (рис. 11), из анализа показателей, зависящих от скорости и степени деформации, установлено следующее:

- скорость упрочнения материала (B) растет с увеличением температуры до 900 °С, а далее снижается, что может свидетельствовать о протекании структурно-фазовых превращений в данном температурном интервале (900–1000 °С);
- степень упрочнения с ростом температуры снижается, что является типичным механизмом для многих сплавов;
- зависимость и степень зависимости предела текучести от скорости деформации также косвенно подтверждают наличие структурно-фазовых превращений, что требует дальнейших исследований.

Расчет коэффициентов по приведенной модели для температуры 1100 °С невозможен в связи с характерным видом кривой растяжения.

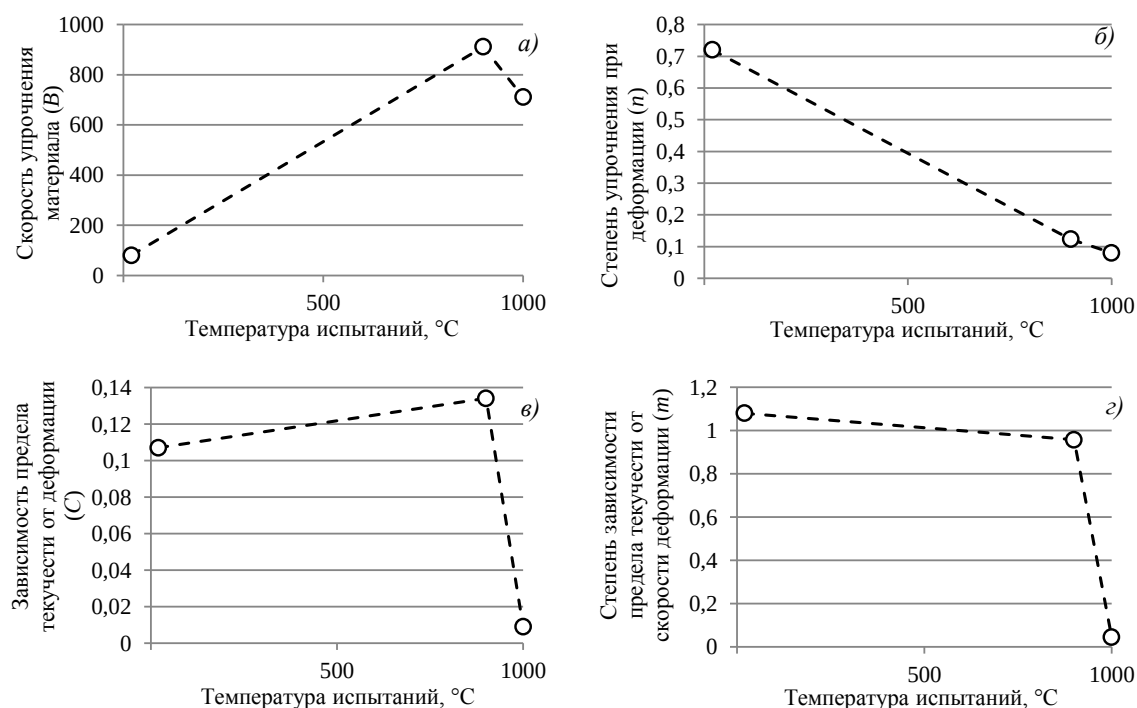


Рис. 11. Рассчитанные коэффициенты по модели Джонсона-Кука для образцов из высокоэнтروпийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC при различных температурах испытаний: а – B ; б – n ; в – C ; з – m

Анализ полученных результатов показывает, что литой высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC обладает достаточно высокими характеристиками и при этом у него отмечен эффект деформационного упрочнения при комнатной температуре, а в температурном интервале 900–1100 °С реализуются структурно-фазовые превращения, которые требуют углубленных исследований. Сплав также имеет потенциал для увеличения комплекса свойств путем горячей деформации и термической обработки, что необходимо изучить в дальнейшем.

Заключения

Одна из ключевых стратегий современного материаловедения – это поиск материалов с уникальным комплексом характеристик, которые, в свою очередь, способны обеспечить повышение тактико-технических и снижение массогабаритных характеристик перспективных изделий. Разработка и исследование новых материалов, таких как

высокоэнтропийные сплавы, имеет важное значение при реализации стратегических направлений развития.

В данной работе проведены исследования структуры, фазового состава и механических свойств высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC и установлено, что:

– в структуре высокоэнтропийного сплава NiCoCrWNbAlTiReC формируется равномерная структура на основе элементов Ni, Cr и Co; в теле зерна образуются единичные включения комплексных карбидов (Nb, Ti)C, а по границам зерен – карбиды хрома предположительной стехиометрии Cr₂₂WC₆ в виде сетки с дополнительными включениями;

– при испытании на статическое растяжение при температуре 20 °С зафиксировано деформационное упрочнение, а изменение механических свойств показало наличие структурно-фазовых превращений в температурном интервале 900–1100 °С;

– в литом состоянии пределом длительной прочности на базе 100 ч при температуре 1100 °С является напряжение 10 МПа;

– рассчитанные по модели Джонсона–Кука коэффициенты также подтверждают наличие структурно-фазовых превращений в температурном интервале 900–1100 °С.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что высокоэнтропийный сплав NiCoCrWNbAlTiReC имеет потенциал для повышения физико-механических характеристик путем горячей деформации и термической обработки.

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Севальнев Г.С., Коробова Е.Н., Дворецков Р.М. и др. Влияние степени дисперсности структуры мартенсита и размера карбидной фазы на фрикционное взаимодействие в условиях сухого трения скольжения высокоуглеродистой комплексно-легированной стали // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Севальнев Г.С. Бериллийсодержащие стали – перспективный материал с высоким уровнем физико-механических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
3. Капланский Ю.Ю., Мазалов П.Б. Мировые тенденции развития тугоплавких высокоэнтропийных сплавов для теплонагруженных узлов аэрокосмической техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Исследование и разработка технологических параметров плавки в вакууме коррозионностойких жаропрочных никелевых сплавов // Металлург. 2021. № 2. С. 62–67.
5. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation // Materials Science Forum. 2007. Vol. 560. P. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
7. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys // Entropy. 2014. Vol. 16. No. 9. P. 4749–4768.
8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes // Advanced Engineering Materials. 2004. Vol. 6. P. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.

9. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie-Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. P. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements // *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2004. Vol. 35. P. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
11. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. P. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
12. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтروпийных сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
13. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Осин И.В., Дворецков Р.М. Исследование возможности получения высокоэнтропийного сплава VNbMoTaW путем смешивания элементарных порошков с дальнейшим компактированием методом гибридного искрового плазменного спекания // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
14. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. 2019. Vol. 4. P. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
15. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2018. Vol. 10 (6). P. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
16. Smith T. GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing // *Lawrence Livermore National Lab Seminar*. 2022. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (дата обращения: 25.07.2024).
17. Smith T. High Temperature Alloy Development for AM–GRX-810 // *Bridging the Gap Webinar: Emerging Additive Manufacturing Materials*. 2023. URL: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (дата обращения: 25.07.2024).
18. NASA’s New Material Built to Withstand Extreme Conditions. URL: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (дата обращения: 25.07.2024).
19. The Materials Project. URL: next-gen.materialsproject.org (дата обращения: 25.07.2024).
20. Johnson G.R., Cook W.N. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures // *Proceedings of the 7th Intern. symp. on ballistics* (Hague, Netherlands, Apr. 19–21, 1983). Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands, 1983. P. 541–547.
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // *Engineering fracture mechanism*. 1985. Vol. 21. No. 1. P. 31–48.
22. Лукин Е.И., Ашмарин А.А., Банных И.О. и др. Исследование влияния величины обжатия при холодной прокатке на фазовый состав, текстуру и остаточные напряжения в стали 20Х15АНЗМД2 // *Металлы*. 2023. № 6. С. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
23. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

References

1. Sevalnev G.S., Korobova E.N., Dvoreckov R.M., Doroshenko A.V., Muzafarova S.-V.R., Samoilova I.I. Influence of the degree of martensitic structure dispersion and size of carbide phase on the frictional interaction under conditions of dry sliding friction of high-carbon complex alloy steel. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-15-26.
2. Sevalnev G.S. Beryllium-containing steels – perspective material with a high level of physical and mechanical properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.

3. Kaplanskii Yu.Yu., Mazalov P.B. World trends in the development of refractory high-entropy alloys for heat-loaded units of aerospace technics (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-30-42.
4. Kablov E.N., Sidorov V.V., Min P.G., Vadeev V.E., Kramer V.V. Research and development of technological parameters for vacuum melting of corrosion-resistant heat-resistant nickel alloys. *Metallurg*, 2021, no. 2, pp. 62–67.
5. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – a new era of exploitation. *Materials Science Forum*, 2007, vol. 560, pp. 1–9. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1.
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. DOI: 10.1016/j.msea.2003.10.257.
7. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*, 2014, vol. 16, no. 9, pp. 4749–4768.
8. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J. et al. Nanostructured highentropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 2004, vol. 6, pp. 299–303. DOI: 10.1002/adem.200300567.
9. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*, 2006, vol. 31, pp. 633–648. DOI: 10.3166/acsm.31.633-648.
10. Yeh J.-W., Chen S.-K., Gan J.-Y. et al. Formation of simple crystal structures in Cu–Co–Ni–Cr–Al–Fe–Ti–V alloys with multiprincipal metallic elements. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2004, vol. 35, pp. 2533–2536. DOI: 10.1007/s11661-006-0234-4.
11. Singh S., Wanderka N., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi highentropy alloy. *Acta Materialia*, 2011, vol. 59, pp. 182–190. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.09.023.
12. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
13. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Osin I.V., Dvoretzky R.M. The research of the possibility of high entropy alloy VNbMoTaW production by mixing elementary powders with further hybrid spark plasma sintering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 12–20. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-12-20.
14. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*, 2019, vol. 4, pp. 515–534. DOI: 10.1038/s41578-019-0121-4.
15. Zhang Y., Zhou Y.J., Lin J.P. et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys. *Advanced Engineering Materials*, 2018, vol. 10 (6), pp. 534–538. DOI: 10.1002/adem.200700240.
16. Smith T. GRX-810: NASA High Temperature Alloy Development for Additive Manufacturing. *Lawrence Livermore National Lab Seminar*, 2022. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220013032> (accessed: July 25, 2024).
17. Smith T. High Temperature Alloy Development for AM–GRX-810. *Bridging the Gap Webinar: Emerging Additive Manufacturing Materials*. 2023. Available at: ntrs.nasa.gov/citations/20230010486 (accessed: July 25, 2024).
18. *NASA's New Material Built to Withstand Extreme Conditions*. Available at: <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasas-new-material-built-to-withstand-extreme-conditions/> (accessed: July 25, 2024).
19. *The Materials Project*. Available at: next-gen.materialsproject.org (accessed: July 25, 2024).
20. Johnson G.R., Cook W.N. A constitutive model and data for metals subjected to large strains. High rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th Intern. symp. on ballistics* (Hague, Netherlands, Apr. 19–21, 1983). Hague: Roy. Inst. of Engrs in the Netherlands, 1983, pp. 541–547.
21. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering fracture mechanism*, 1985, vol. 21, no. 1, pp. 31–48.

22. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Study of the influence of the reduction value during cold rolling on the phase composition, texture and residual stresses in 20Kh15AN3MD2 steel. *Metally*, 2023, no. 6, pp. 26–34. DOI: 10.31857/S0869573323060046.
23. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.

Информация об авторах

Власов Иван Игоревич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Ляхов Антон Алексеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нефедкин Данила Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan I. Vlasov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Danila Yu. Nefedkin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.09.2024.
The article was submitted 16.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.09.2024.

Научная статья

УДК 620.187

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ И РАСТРОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Л.В. Морозова¹, В.Б. Григоренко², А.М. Терехин²

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

²Производственный Комплекс «Салют» Акционерного Общества «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия; info@uecrus.com

Аннотация. Установлены причины выхода из строя деталей газотурбинных двигателей. Методами оптической металлографии, фрактографии высокого разрешения и электронно-зондового анализа исследованы структура и особенности разрушения. Показано, что материалы деталей по структуре, твердости и химическому составу соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Наиболее вероятными причинами разрушения подшипника качения являются нарушения в системе подачи масла. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных в межзубной впадине.

Ключевые слова: растровая электронная микроскопия, фрактографический анализ, оптическая микроскопия, микроструктура, легированная сталь, хрупкое разрушение, усталостное разрушение, подшипник, шестерня

Для цитирования: Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Анализ причин разрушения деталей редукторов методами оптической и растровой микроскопии // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43.

Scientific article

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DESTRUCTION OF GEARBOX PARTS BY METHODS OF OPTICAL AND SCANNING MICROSCOPY

L.V. Morozova¹, V.B. Grigorenko², A.M. Terekhin²

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

²Production Complex «Salut» of Joint Stock Company «United Engine Corporation», Moscow, Russia; info@uecrus.com

Abstract. The causes of failure of gas turbine engine parts have been identified. The structure and features of destruction have been studied using optical metallography, high-resolution fractography and electron probe analysis. It has been shown that the materials of the parts comply with the requirements of regulatory documentation in terms of structure, hardness and chemical composition. The most probable causes of rolling bearing failure are faults in the oil supply system. The destruction of the gear developed according to the fatigue mechanism from scratches located in the gullet.

Keywords: scanning electron microscopy, fractographic analysis, optical microscopy, microstructure, alloy steel, brittle fracture, fatigue fracture, bearing, gear

For citation: Morozova L.V., Grigorenko V.B., Terekhin A.M. Analysis of the causes of destruction of gearbox parts by methods of optical and scanning microscopy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-31-43.

Введение

В основе исследований, проводимых с целью выявления причин разрушения всевозможных деталей, лежит металлографический анализ, позволяющий получать информацию об основных элементах структуры металлических материалов. В современных условиях существуют различные способы получения изображения структуры – например, оптическая, лазерная и электронная микроскопия. *Оптическая микроскопия* имеет ряд ограничений при получении изображений – разрешающая способность ограничена длиной волны, формирование контраста связано с качеством подготовки поверхности образца и геометрическими параметрами отражения пучка света от его поверхности. *Растровая электронная микроскопия* (РЭМ) позволяет выводить на новый уровень возможности структурных исследований благодаря использованию иных физических принципов формирования изображения. Детектирование различного типа электронов, образующихся в результате взаимодействия испускаемого катодом пучка электронов с материалом образца, позволяет получать изображения с различным контрастом и большой глубиной фокуса при кратности увеличений от единиц до десятков тысяч. Использование РЭМ позволяет изучать как плоские микрошлифы с целью исследования микроструктуры и фазового анализа, так и шероховатые поверхности изломов. Оснащенность растровых микроскопов приставками для кристаллографического (EBSD) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) еще больше расширяет возможности исследований. Таким образом, сочетание оптического исследования микроструктуры с возможностями исследований, проводимых с помощью РЭМ, позволяет провести комплексный анализ разрушенных деталей с определением химического состава изделия и его конкретных фаз, структурных составляющих, их ориентации и строения поверхности разрушения.

В настоящее время для обеспечения качественного быстрого перехода к производству машин и агрегатов на высоком технологическом уровне, оснащенность заводских лабораторий новым высокоточным исследовательским оборудованием должна приближаться к оснащенности лабораторий в передовых научно-исследовательских институтах. С помощью расширения программ обучения можно обеспечить потребности предприятий в инженерах-исследователях высокой квалификации. Правильность выводов, полученных при анализе разрушений, зависит от способности исследователя не только применять современное оборудование, но и от понимания им процессов, происходящих в материале на макро-, мезо- и микроуровнях, с учетом всех факторов, непосредственно влияющих на комплекс свойств материалов и изделий из них, а также от способности правильно интерпретировать полученные данные [1].

Устройство большинства сложных технических систем невозможно представить без применения в их конструкции редукторов. Для изготовления деталей редукторов, таких как валы, шестерни и подшипники, используются наиболее качественные легированные стали [2–8]. Стабильная работа узлов в период эксплуатации обусловлена множеством факторов, таких как марка выбранного материала, уровень его механических свойств, технология производства деталей, качество сборки и установки. Она также зависит от грамотной разработки чертежа с учетом соответствия эксплуатационных параметров детали или узла типоразмеру выбранного конструктором подшипника.

Множество исследований разрушенных деталей редукторов показывает, что наибольшее число отказов происходит в результате повреждений при монтаже узлов, отсутствия смазывания, наличия посторонних загрязнений или недостаточно

квалифицированного проектирования. Следующая по распространенности причина отказов – образование усталостных повреждений как на дорожках качения подшипников, так и на поверхности зубьев шестерен [9–11]. Выявляются лишь единичные случаи выхода из строя узлов редукторов, спровоцированные низким металлургическим качеством материалов.

В области промышленности, к которой относится авиационное двигателестроение, ошибки в конструировании (как и нарушение эксплуатационных режимов) ведут к нештатной работе отдельных узлов изделий и, как следствие, могут приводить к масштабным разрушениям или катастрофам.

В многочисленных работах отражены исследования по определению характера и причин разрушений подшипников и шестерен, изготовленных из легированных сталей типа ШХ15, ЭИ347(8Х4В9Ф), 95Х18 и других [12–14], однако лишь ограниченное число работ посвящено комплексному анализу разрушения редукторов.

В данной статье рассмотрены причины разрушения вала, подшипника и шестерни для экспериментального малого газотурбинного двигателя как пример комплексного подхода с применением различных методов металлофизических исследований.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Полученные результаты исследований являются продуктом деятельности АО «ОДК».

Материалы и методы

При исследовании причин разрушения узлов двигателей проводили анализ нормативно-технической документации, внешний осмотр, фрактографический анализ мест разрушения, анализ микроструктуры и химического состава.

Анализ химического состава деталей проводили спектральным атомно-абсорбционным методом в соответствии с требованиями ГОСТ 22536–88.

Подготовку шлифов осуществляли с применением металлографического комплекса. В зависимости от химического состава материала микроструктуру образцов выявляли электролитическим методом либо травлением в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

При помощи оптических микроскопов высокого разрешения изучали микроструктуру деталей. С применением растрового электронного микроскопа с приставкой для энергодисперсионного анализа, проводимого в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015, изучали тонкую структуру, осуществляли фрактографический и рентгеноспектральный микроанализ.

Результаты и обсуждение

Во время испытаний малого опытного газотурбинного двигателя с условным номером 1 произошло разрушение таких деталей, как гайка, однорядный подшипник качения и вал.

При осмотре *гайки* установлено, что она значительно повреждена с обеих сторон: с одной стороны поверхность окислена до темно-серого цвета, с противоположной – наблюдается намазывание материала сопряженной детали.

Визуальный осмотр *вала* показал наличие деформации и разрушения в месте посадки подшипника. На поверхности вала обнаружены глубокие кольцевые риски от приработки и намазывание постороннего материала, наблюдается также значительное повреждение излома.

Внешний осмотр наружного и внутреннего колец подшипника выявил повреждения дорожек качения в виде вмятин и налипания постороннего материала. Наружное кольцо – серое, блестящее; внутреннее кольцо с посадочной поверхности окислено до синего цвета, на торцах – до темно-синего цвета, на дорожке качения – до черного. На дорожке качения внутреннего кольца имеются глубокие вмятины неправильной формы, образовавшиеся под воздействием заклинивших шариков (рис. 1).

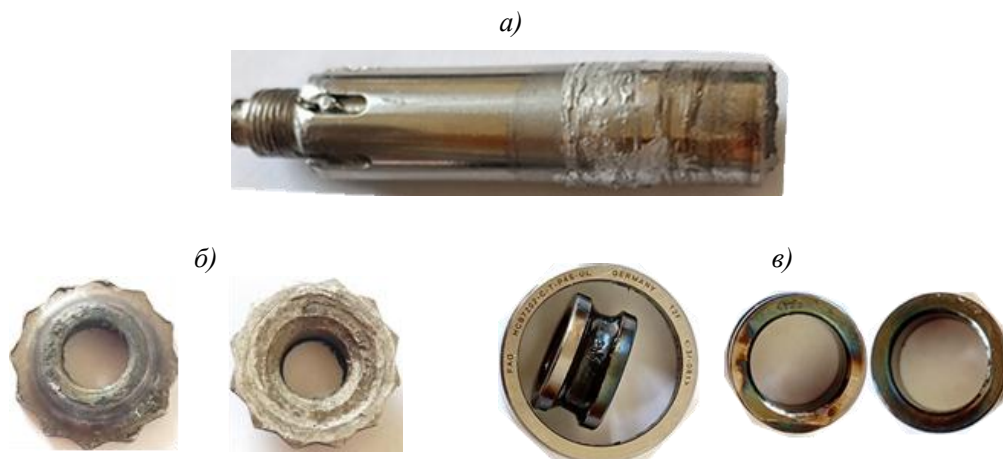


Рис. 1. Общий вид исследованных деталей: а – фрагмент вала; б – гайка; в – наружное и внутреннее кольца подшипника

Для определения детали, разрушение которой вызвало выход из строя остальных узлов, необходимо было провести как металлографический анализ структуры и анализ изломов, так и определение химического состава посторонних материалов, оставивших «следы» на исследуемых деталях.

Исследование микроструктуры вала выявило присутствие крупных и мелких зерен – разнотермичности, наличие и величина которой не оговаривается в нормативно-технической документации на материал. В микроструктуре наблюдается двойникование зерна γ -фазы со строчечными выделениями карбидных фаз. При исследовании микроструктуры в зоне разреза не выявлено дефектов металлургического характера и термической обработки (рис. 2).

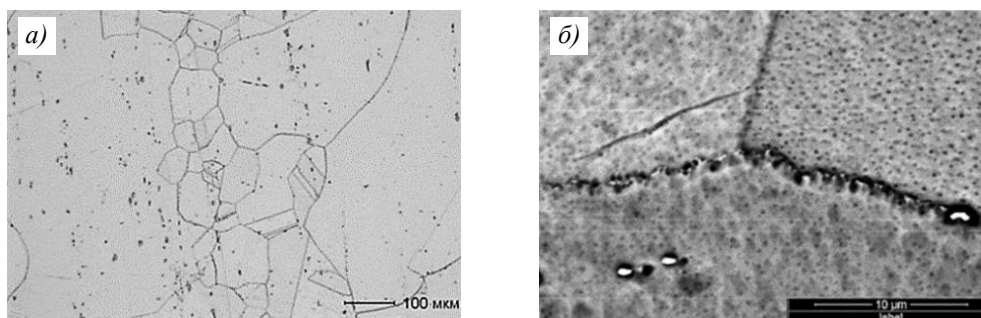


Рис. 2. Микроструктура вала, полученная на оптическом (а) и электронном растровом микроскопах (б)

Фрактографическому анализу подвергли и исходный поврежденный излом вала, и «свежий» излом, полученный после надреза и вскрытия трещины на сохранившейся его части. Полученный в результате надреза излом заведомо не имеет усталостной

составляющей и характерен для статического однократного разрушения. Установлено, что поверхность излома вала перпендикулярна его оси, т. е. геометрическая форма излома совпадает с общеизвестной схемой. Фрагмент разрушенного при испытаниях вала показан на рис. 3 в сравнении со схемой строения излома, характерного для вязкого разрушения при кручении.

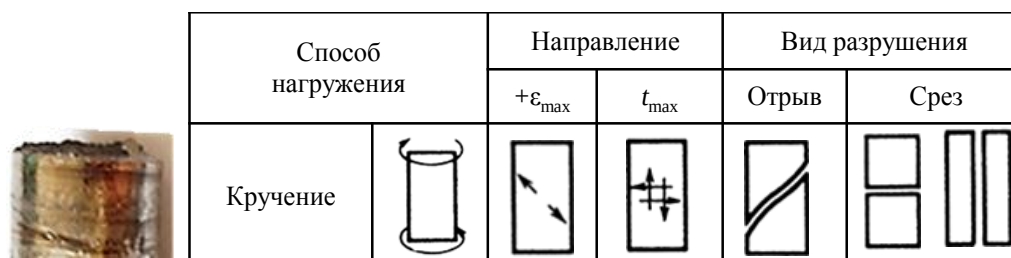


Рис. 3. Излом вала и направления максимальных упругих удлинений и касательных напряжений с траекториями макроразрушения при кручении [15]

Фрактографический анализ обоих образцов выявил одинаковый характер разрушения. Установлено, что разрушение статическое, смешанное внутри- и межзеренное, с образованием малопластичных ямок на поверхности крупных зерен и вязких ямок в области мелких зерен (рис. 4).

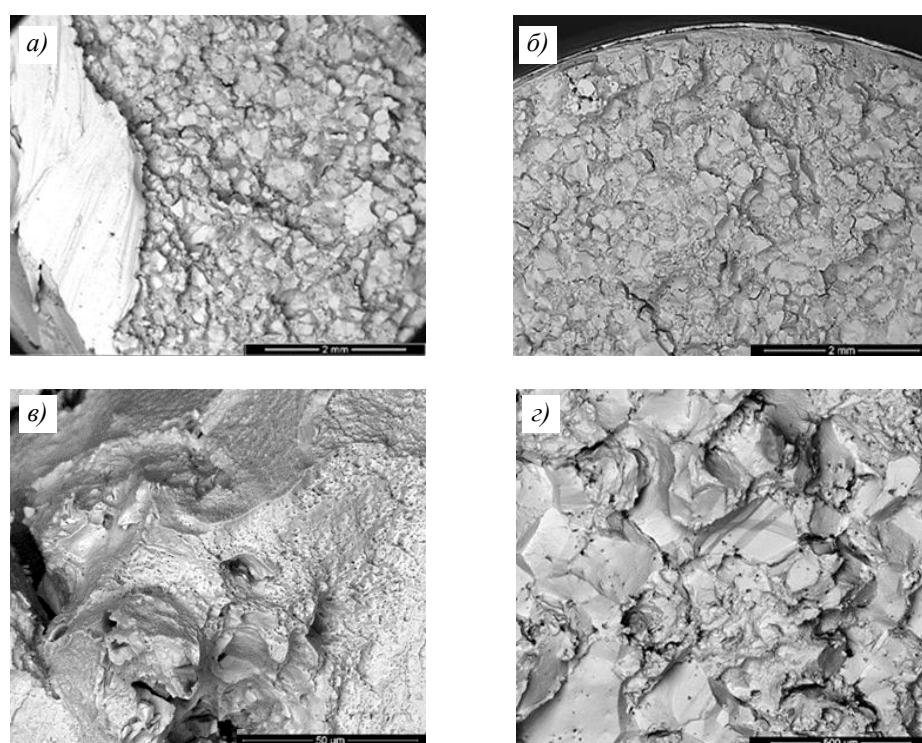


Рис. 4. Строение излома вала

Необходимо обратить внимание на выявленную различными методами (при металлографическом и фрактографическом анализах) разнотернистость, что подтверждает объективность получаемых при исследованиях данных.

Исследование поперечного шлифа, изготовленного из фрагмента наружного кольца подшипника, выявило наличие стесывания и образование заусенцев со стороны более толстого борта кольца (рис. 5, а, б и в, г).

Микроструктура наружного кольца представлена мартенситом отпуска и мелкими равномерно распределенными карбидами сферической формы, что соответствует структуре нормально термообработанной стали типа ШХ15 (рис. 6, а, б).

Анализ микрошлифа из фрагмента внутреннего кольца подшипника выявил не только смятие и налипание материала на дорожку качения, но и выдавливание посадочной поверхности на величину $\sim 0,4$ мм (рис. 6, в).

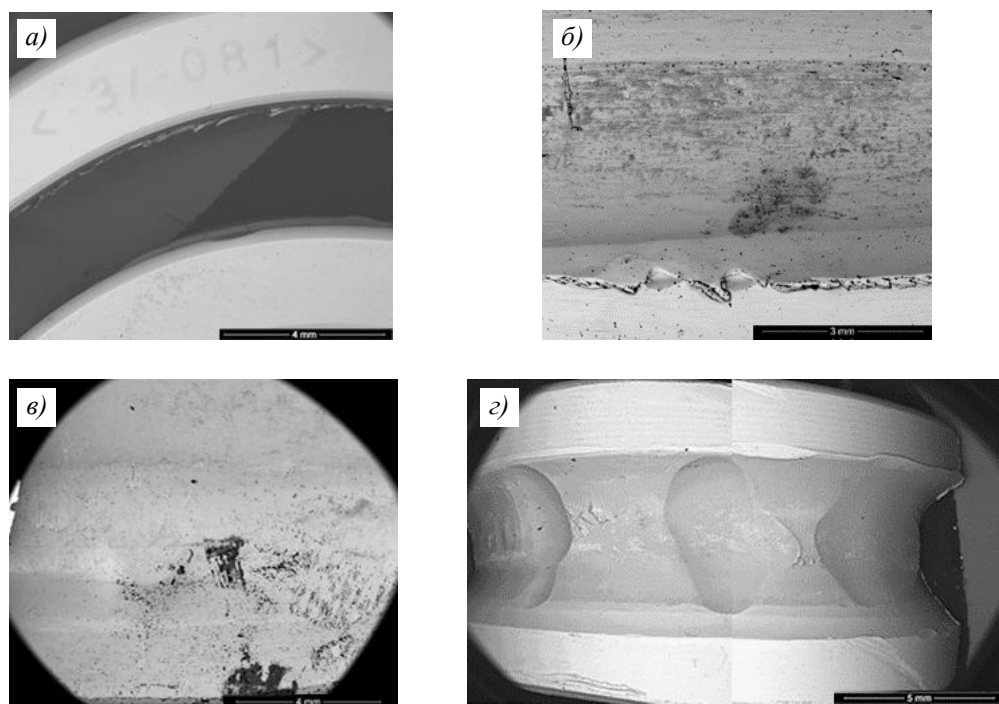


Рис. 5. Поверхность деталей подшипника: а – торцевая поверхность колец; б – дорожка качения наружного кольца; в – посадочная поверхность внутреннего кольца; з – дорожка качения внутреннего кольца

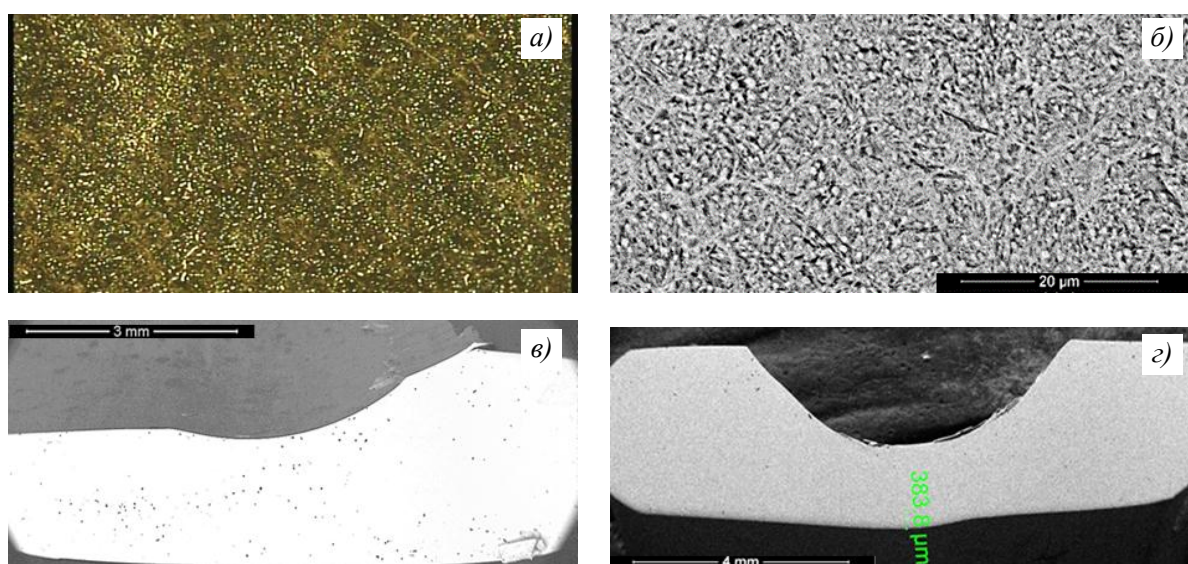


Рис. 6. Характерная микроструктура под дорожкой качения (а, б – $\times 500$) и сечения (в, з) наружного и внутреннего колец подшипника соответственно

Под дорожкой качения внутреннего кольца подшипника выявлена зона воздействия высокой температуры (рис. 7), на отдельных участках которой произошло фазовое превращение мартенсита отпуска в крупноигольчатый мартенсит с большим количеством остаточного аустенита (рис. 7, з, е). Можно предположить, что температура в материале кольца достигала $\sim 800^\circ\text{C}$. Непосредственно под дорожкой качения имеется зона деформированного материала (рис. 7, ж, и).

Форма отпечатков шариков на дорожке качения внутреннего кольца указывает на то, что шарики также разогрелись до температуры, значительно превышающей рабочую, и существенно деформированы.

В результате проведенного анализа установлено, что материалы исследованных деталей соответствуют требованиям чертежей и нормативной документации, т. е. их разрушение не может быть вызвано качеством металла – в структуре не выявлены металлургические дефекты, отклонения от заявленного химического состава или нарушения в процессах термической обработки.

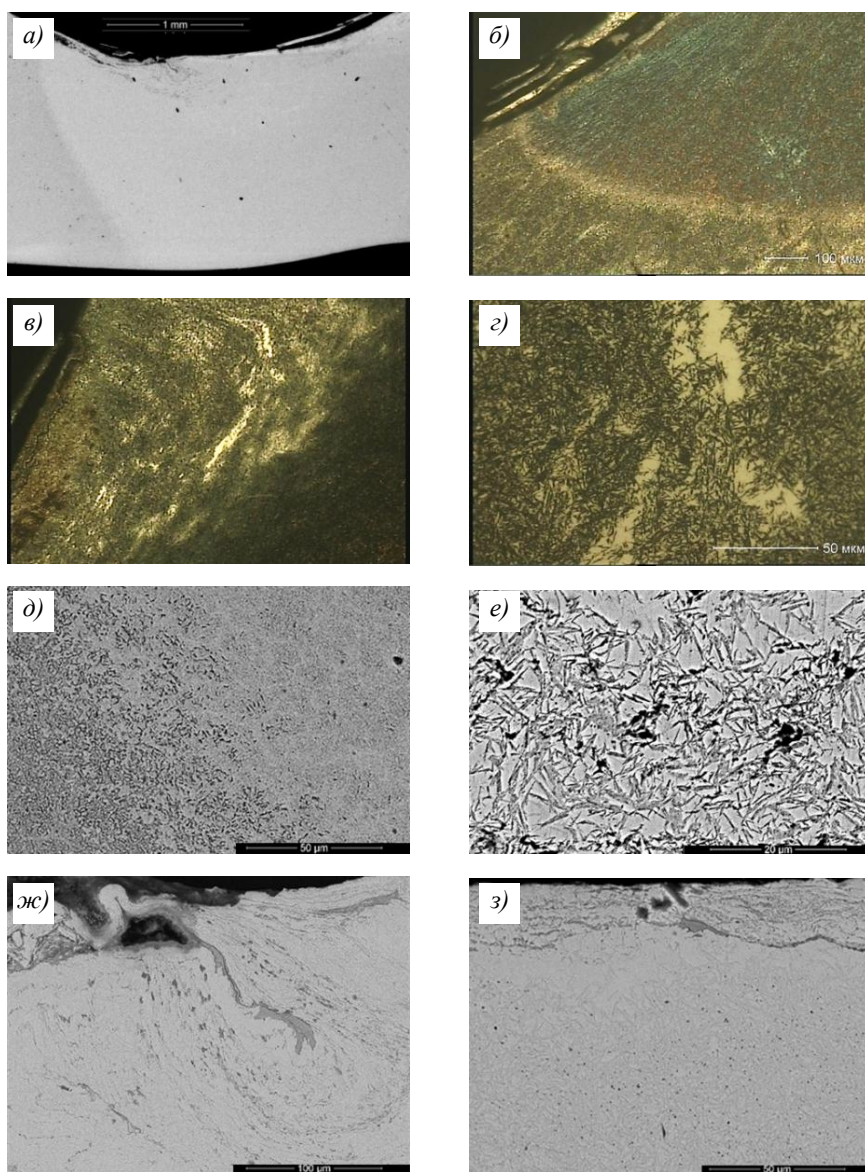


Рис. 7. Микроструктура внутреннего кольца подшипника под дорожкой качения

Наличие цветов побежалости на внутреннем кольце, обнаруженные структурные изменения материала кольца и, вероятно, не предоставленных на исследование шариков свидетельствуют о недостаточном смазывании подшипника во время эксплуатации. Для определения причин и последовательности выхода из строя вала и подшипника двигателя использован анализ материалов, выявленных в виде «намазываний» на той или иной детали. Наиболее широко применяемым в данном случае является метод РСМА.

Предварительно определен элементный состав сплавов, из которых изготовлены исследуемые детали, и подтверждено соответствие этих материалов требованиям чертежей. Далее методом РСМА определяли состав материалов, обнаруженных на поврежденных поверхностях.

Проведенный анализ поверхности гайки (рис. 8, а, б) подтвердил, что она изготовлена из легированной стали, указанной в чертеже. На поверхности гайки с обеих сторон обнаружены налипания материала подшипника из стали типа ШХ15; с нижней стороны обнаружены намазывания материала сопряженной детали из алюминиевого сплава.

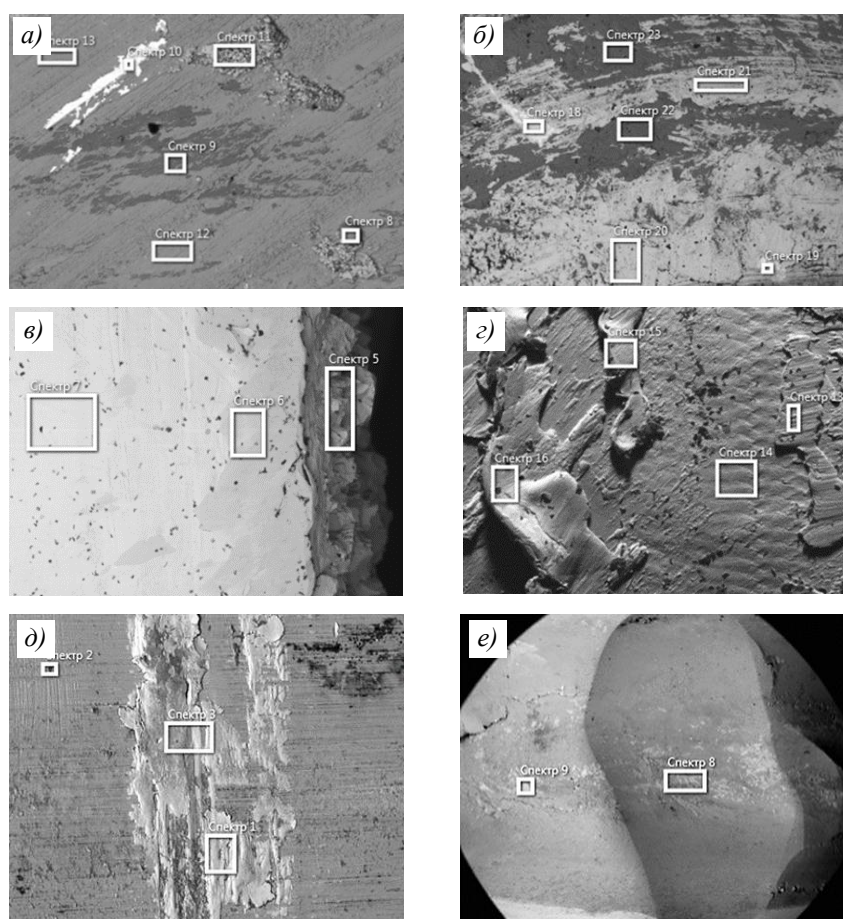


Рис. 8. Рентгеноструктурный микроанализ деталей исследованного узла на поверхности гайки (а, б), вала (в, г) и подшипника (д, е)

На поверхности вала, изготовленного из никелевого сплава, вблизи излома выявлены следы посторонних материалов на основе железа: обнаружены участки налипания материалов, по спектру совпадающих с характерным для марки стали типа ШХ15 спектром и спектром материала гайки (рис. 8, в, г).

На посадочной поверхности внутреннего кольца подшипника обнаружены налипания никелевого сплава (материала вала) и алюминиевого сплава – фрагментов материала, обнаруженного ранее на одной из сторон гайки (рис. 8, д, е).

Проведенные исследования показали, что на поверхностях деталей присутствуют налипания материалов сопряженных деталей. Судя по степени повреждения и разогрева, первым вышел из строя подшипник вследствие недостатка смазочного материала. В свою очередь разрушение подшипника привело к разрушению вала и гайки.

Таким образом, наиболее вероятными причинами разрушения деталей двигателя 1 являются нарушения в системе подачи масла.

Рассмотрим разрушение шестерни из стали 16ХЗНВФМБ-Ш, произошедшее при испытаниях двигателя с условным номером 2, которое выявлено при последующей разборке и дефектации двигателя.

На рис. 9 показан общий вид фрагментов разрушенной *шестерни*. При визуальном осмотре установлено наличие повреждений излома и расположенных вблизи излома восьми зубьев шестерни: отмечаются глубокие вмятины, врезания, стесывания вершин и сколы на зубьях. На поверхности полотна шестерни со стороны «входа» отмечены точечные врезания.

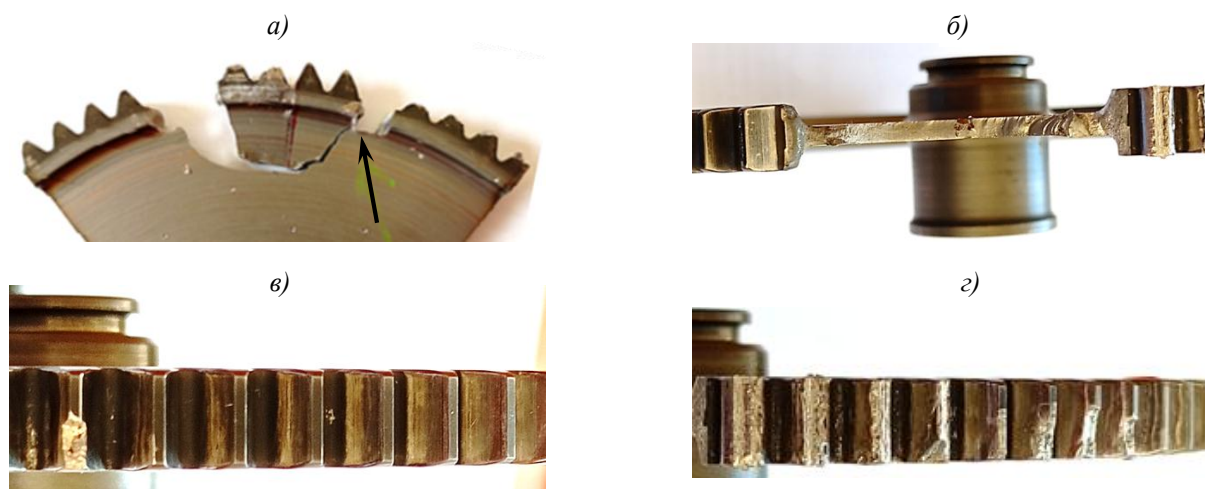


Рис. 9. Общий вид фрагментов шестерни (а, б) и поврежденных зубьев (в, г)

Исследование микроструктуры шестерни (рис. 10) показало, что глубина и твердость цементованного слоя соответствуют требованиям нормативно-технической документации. В макро- и микроструктуре металлургических дефектов или дефектов термической обработки и цементации не обнаружено.

Установлено отсутствие одного зуба в месте очага разрушения (стрелка на рис. 9, а). Осмотр излома выявил участок на полотне шестерни, от которого в обе стороны распространялась усталостная трещина (рис. 9, б и 11, а), однако данный участок не является очагом разрушения, а наблюдаемая поверхность разрушения – результат развития (разветвления) первичной трещины.

Осмотр отделившихся фрагментов на растровом микроскопе выявил очаг разрушения, находящийся на фаске межзубной впадины одного из отделившихся фрагментов (рис. 11), от которого распространялась первичная усталостная трещина. Вблизи очага обнаружены риски от механической обработки (рис. 12, б), поверхность излома в очаге повреждена.

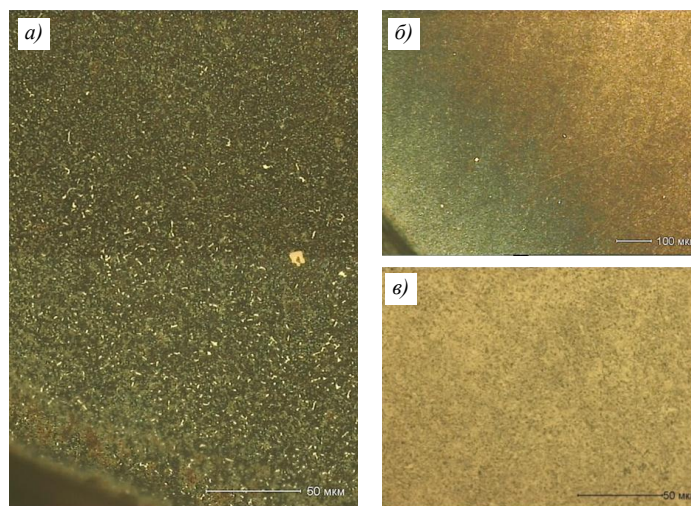


Рис. 10. Микроструктура шестерни: *а, б* – цементованный слой; *в* – сердцевина

Осмотр соседних межзубных впадин также показал наличие глубоких рисок на поверхности фасок, что указывает на проведение механической зачистки. Область межзубных фасок вследствие цементации приобретает высокую твердость, что, в свою очередь, ведет к снижению пластичности. Глубокие риски, наведенные в этой области, становятся концентраторами напряжений и способны стать очагами разрушения.

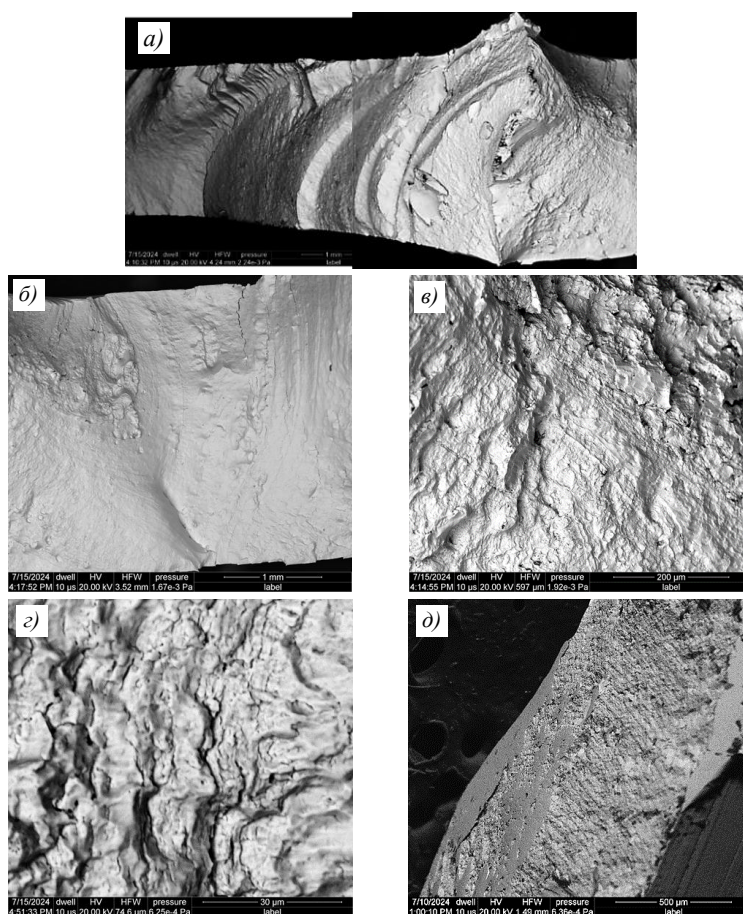


Рис. 11. Вид излома шестерни: *а* – выступ, показанный стрелкой на рис. 9, *а; б-г* – характерный усталостный рельеф по обе стороны от выступа; *д* – участок в центральной части излома с повторно-статическим разрушением

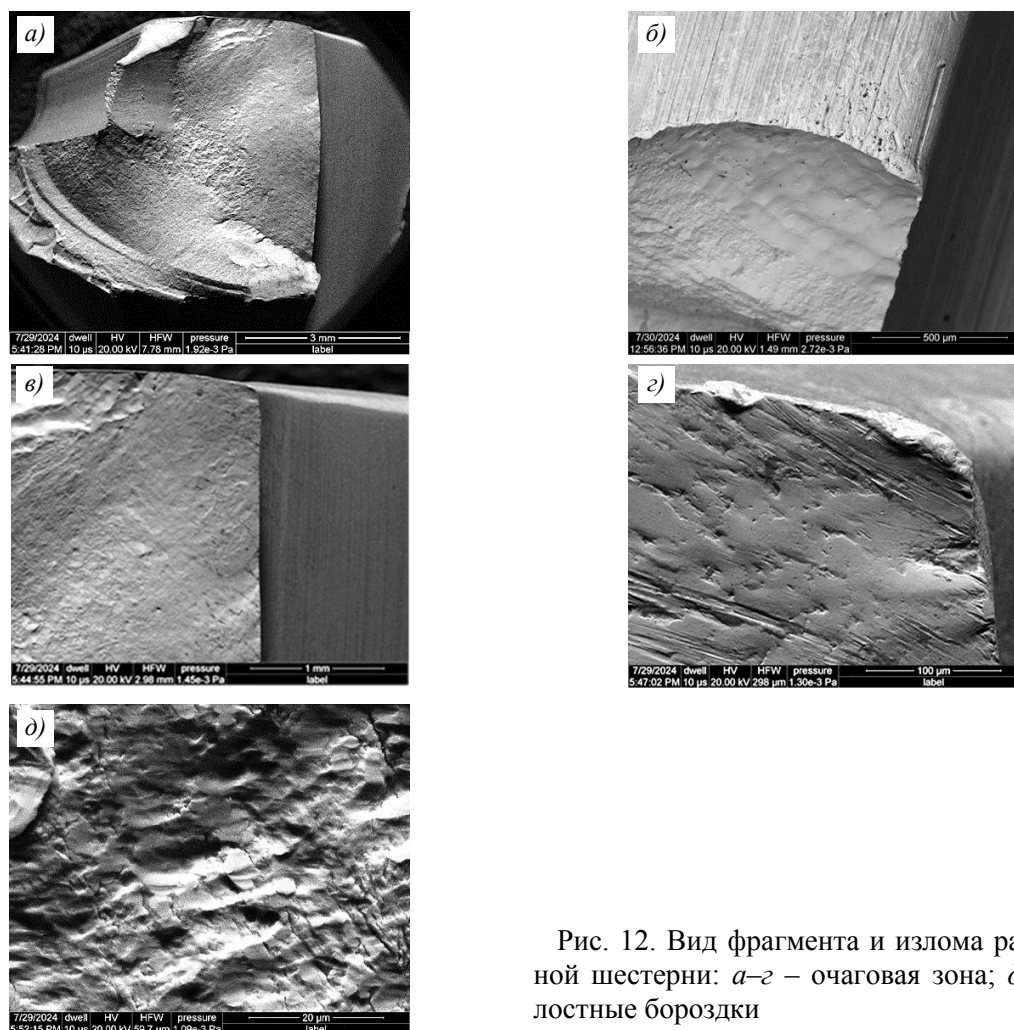


Рис. 12. Вид фрагмента и излома разрушенной шестерни: а–с – очаговая зона; д – усталостные бороздки

Согласно результатам исследования, материал шестерни по химическому составу, твердости, микроструктуре сердцевины и цементованного слоя соответствует требованиям нормативно-технической документации. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных на поверхности межзубной впадины.

Заключения

В результате проведенного анализа установлено, что материалы исследованных деталей двигателя 1 соответствуют требованиям чертежей и нормативно-технической документации – в структуре отсутствуют металлургические дефекты. Отклонения от заявленного химического состава или нарушения в процессах термической обработки не выявлены.

Обнаруженные структурные изменения материала кольца подшипника, наличие цветов побежалости на его внутренней поверхности и вмятин неправильной формы от шариков указывают на разогрев до температуры, значительно превышающей рабочую, и свидетельствуют о недостаточном смазывании подшипника в процессе эксплуатации.

По результатам проведенного исследования установлено: первым вследствие недостатка смазочного материала вышел из строя подшипник, что, в свою очередь, привело к разрушениям вала и гайки. Наиболее вероятными причинами разрушения деталей двигателя 1 являются нарушения в системе подачи масла.

Анализ шестерни двигателя 2 показал, что по химическому составу, твердости, микроструктуре сердцевины и цементованного слоя материал детали соответствует

требованиям нормативно-технической документации. Разрушение шестерни развивалось по усталостному механизму от глубоких рисок, расположенных на поверхности межзубной впадины.

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., 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.
3. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 741 с.
4. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 2. 532 с.
5. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тонышева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-159-174.
6. Петраков А.Ф., Шалькевич А.Б. Высокопрочные стали в авиастроении // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 180–191.
7. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
8. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Наприенко С.А. Исследование эксплуатационных разрушений подшипников методами оптической, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа // Труды ВИАМ. 2016. № 1 (37). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
10. Морозова Л.В., Орлов М.Р. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S1 (38). С. 37–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48.
11. Севальнев Г.С., Громов В.И., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г. Контактная выносливость азотистых аустенито-мартенситных сталей с различным механизмом упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
12. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г. и др. Влияние фазового состава аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш на характеристики сухого трения скольжения в трибоконтакте со сталью ШХ15 // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 10. С. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
13. Спектор А.Г., Зельбет Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. М.: Металлургия, 1980. 264 с.
14. Гулина И.В., Седов О.В., Яковлев Н.О., Гриневич А.В. Особенности испытания подшипниковой стали // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
15. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.

2. 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.
3. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., abrid. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 1, 741 p.
4. *Special steels*: in 2 vols. 2nd ed., abrid. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 532 p.
5. Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Pokrovskaya N.G., Tonysheva O.A. High-strength constructional and corrosion-resistant steels developed by VIAM for aviation engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-159-174.
6. Petrakov A.F., Shalkevich A.B. High-strength steels in aircraft construction. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS–VIAM, 2002, pp. 180–191.
7. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
8. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
9. Orlov M.R., Grigorenko V.B., Morozova L.V., Naprienko S.A. Research of operational damages of bearings by methods of optical microscopy, scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 9. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-62-79.
10. Morozova L.V., Orlov M.R. Research of failure causes of cogwheels in operational process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S1, pp. 37–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48.
11. Sevalnev G.S., Gromov V.I., Dulnev K.V., Sevalneva T.G. Contact endurance of nitrogenous austenitic-martensitic steels with different hardening mechanism. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
12. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G. et al. Influence of the phase composition of austenitic-martensitic TRIP steel VNS9-Sh on the characteristics of dry sliding friction in tribocontact with steel ShKh15. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2021, no. 10, pp. 20–27. DOI: 10.31044/1814-4632-2021-10-20-27.
13. Spektor A.G., Zelbet B.M., Kiseleva S.A. *Structure and properties of bearing steels*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p.
14. Gulina I.V., Sedov O.V., Yakovlev N.O., Grinevich A.V. Features of the tested bearing steel. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10 (82), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83.
15. Zolotarevsky V.S. *Mechanical properties of metals*: textbook for universities. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p.

Информация об авторах

Морозова Лариса Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Григоренко Валентина Борисовна, ведущий инженер, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Терехин Андрей Михайлович, начальник центральной заводской лаборатории, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

Information about the authors

Larisa V. Morozova, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina B. Grigorenko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Andrey M. Terekhin, Head of the central factory laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.11.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.11.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕЗАВТОКЛАВНЫМ ФОРМОВАНИЕМ ПРЕПРЕГОВ

А.И. Ткачук¹, П.А. Кузнецова¹, К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваев¹

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

Аннотация. *Переработка полимерных композиционных материалов способами безавтоклавного формования находит все более широкое применение при изготовлении изделий самого различного применения. Для получения высококачественных композитов необходимо использовать технологические процессы, обеспечивающие прогнозируемые и оптимальные свойства материала. Обзор посвящен технологическим особенностям изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов.*

Ключевые слова: *вакуумное формование, препрег, семипрег, связующее, технологический пакет, вакуумирование, пропитка, полимерные композиционные материалы*

Для цитирования: Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

Scientific article

SOME TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY NON-AUTOCCLAVE MOLDING OF PREPREGS

A.I. Tkachyk¹, P.A. Kyznecova¹, K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹

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 processing of polymer composite materials by methods of non-autoclave molding is increasingly used in the manufacture of products for a wide variety of applications. To carry out the process of manufacturing the material and obtaining its maximum properties, it is necessary to use technological processes that ensure the manufacture of materials with predictable and optimal properties. The review is devoted to the technological features of the manufacture of polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs.*

Keywords: *vacuum forming, prepreg, semipreg, binder, technological package, vacuuming, impregnation, polymer composite materials*

For citation: Tkachyk A.I., Kyznecova P.A., Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

Введение

Изделиям из полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготовленным из препрегов на основе углеродных и стеклянных волокон, уделяется особое внимание в различных отраслях промышленности благодаря их легкости [1–3]. Рынок препрегов в значительной степени расширяется в первую очередь за счет аэрокосмического сектора, однако в авто- и машиностроении его доля также постоянно увеличивается.

Как в авиационной, так и в других высокотехнологичных отраслях промышленности растет потребность в новых экономичных и экономически целесообразных изделиях. Это вызывает необходимость постоянного обновления как самих материалов для этих изделий, так и технологий их изготовления [1–3]. По сравнению с металлическими материалами ПКМ, изготовленные с использованием препреговых технологий, обладают рядом преимуществ, таких как выдающееся соотношение механических свойств и массы, высокие значения удельной прочности и жесткости, сопротивления усталости [4–6].

Кроме того, наблюдающийся в мировой промышленности переход на электромобили открывает новые возможности применения препрегов. С использованием ПКМ изготавливаются элементы кузова и салона, корпуса для аккумуляторов и другие комплектующие. При этом разработчикам изделий из ПКМ необходимо достичь повышения энергоэффективности процесса производства автомобильных компонентов и запаса емкости аккумуляторов, а также соответствия упруго-прочностных показателей требованиям нормативных актов. Таким образом, с развитием высокотехнологичных отраслей промышленности наблюдается расширение сфер применения данных материалов, что в свою очередь стимулирует исследования по разработке новых связующих и препрегов на их основе.

Однако достаточно высокая стоимость изготовления полимерных материалов, особенно в гражданских секторах, где важна экономическая эффективность производства, является главным тормозящим фактором их более широкого применения. Препреги на основе углеродных наполнителей обычно стоят дороже, чем традиционные материалы, такие как металлы или термопласты. Стоимость химических компонентов и технологической оснастки, затраты на оборудование и утилизацию отходов, а также жесткие технологические регламенты являются основными причинами высокой стоимости конечных изделий.

Вследствие пандемии Covid на рынке углеродных и стеклянных ПКМ наблюдался глобальный экономический спад, вызванный в первую очередь остановкой или снижением активности ряда производств, а также значительными проблемами с логистикой компонентов и комплектующих во время карантина. Основные потребители композиционных материалов (авиационная и автомобильная промышленности) были вынуждены снизить темпы производства в связи со снижением объемов заказов. Однако в настоящее время рынок препрегов уверенно набирает темпы развития в связи с увеличением доли государственных заказов на производство высокотехнологичной продукции не только в гражданской, но и военной отраслях, а также с повышенным интересом общества к проблемам экологии.

Основными разработчиками технологий и производителями на мировом рынке препрегов являются компании Mitsubishi Rayon Co. Ltd., PRF Composite Materials, Barrday Corporation, GMS Composites, Hankuk Carbon, ABC Composites, Solvay, Teijin Ltd., Park Electrochemical Corporation, Axiom Materials, HC Composite, Kineco, Taiwan First Li-Bond Co. Ltd., North Thin Ply Technology, TCR Composites, Toray Industries Inc., Hexcel Corporation, Gurit Holding AG, Royal Tencate N.V., SGL Group и др. В России производством препрегов на различных типах наполнителей занимаются НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «Препрег-СКМ» и ООО «Итекма».

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

Материалы и методы

К основным отраслям потребления препрегов, для которых необходимы легкие и прочные материалы, относятся:

- авиакосмический сектор;
- автомобилестроение (спорткары, элементы корпуса и интерьера);
- производство спортивного инвентаря (клюшки для хоккея, гольфа, теннисные ракетки и рамы для самокатов и велосипедов);
- морская индустрия (каркасы спортивных лодок и яхт);
- военный сектор (корпуса ракет, военной техники и бронетехники);
- медицинская сфера (разработка современного оборудования, биопротезирование);
- производство нового промышленного оборудования;
- строительная индустрия;
- ветро- и водородная энергетика (лопасти ветрогенераторов, топливные баки для водорода и топливных элементов).

В авиакосмической и военной промышленности наиболее распространенным методом изготовления высококачественных ПКМ является автоклавирование. Высокое давление используется для удаления излишков смолы вместе с захваченным воздухом, подавления роста пустот ($<1\%$ (объемн.)) и достижения высокой массовой доли волокна ($55\text{--}60\%$ (объемн.)) [7–11]. Однако традиционный автоклавный процесс имеет ряд недостатков: значительные капиталовложения, длительное время производства необходимого оборудования, низкая энергоэффективность и ограничения по размеру получаемых деталей [12, 13]. Это привело к необходимости разработки альтернативных методов отверждения, позволяющих организовать недорогой и высококачественный производственный процесс, таких как вакуумное литье под давлением смолы, инфузия композитной смолы Seeman, инфузия пленки связующего, вакуумное формование препрегов (VBO – vacuum bag only) и т. д. [14–16].

Однако большинство методов инъекции связующего обеспечивает меньшую повторяемость производственного процесса по сравнению с автоклавированием. Кроме того, применение дисперснонаполненных полимерных частиц в качестве упрочняющего агента для улучшения вязкости разрушения ограничено из-за увеличения вязкости связующего и фильтрации частиц на поверхности волокнистого наполнителя.

Ведущие разработчики авиационных изделий, такие как фирмы McDonnell Douglas, EADS и Boeing, проводят новаторские исследования по внедрению безавтоклавных технологий (OoA – Out-of-Autoclave process) изготовления деталей из ПКМ. Одним из таких методов, использующих аналогичные препреговые связующие, является вакуумное формование детали из листов выложенного по форме препрега [17]. Метод гарантирует точный контроль объемной доли и геометрических размеров волокон, а также низкую пористость. Переход от автоклавирования к VBO позволяет провести более экономичный и менее трудоемкий производственный процесс, обеспечивающий повышенную гибкость размеров детали. При этом появляется возможность масштабирования процесса и изготовления деталей из ПКМ на любых производственных площадках (не имеющих автоклава) [18, 19]. При использовании данной технологии, например, для изготовления кузова спортивных электрокаров возможно применение крупногабаритных и недорогих сухожаровых шкафов, тепловых пушек и др. Однако низкое качество вакуума ($<0,1$ МПа), плохая откачка воздуха и/или высокая влажность ухудшают упруго-прочностные характеристики изделий из-за появления дефектов

(пористости, не пропитанных связующим сухих зон в наполнителе). Поэтому первоначально такие материалы предлагали использовать для получения слабонагруженных конструкций [20]. Так, каждый процент содержания пустот в композите, вплоть до общего количества пустот $\sim 4\%$, приводит к снижению межслойной прочности при сдвиге на $\sim 7\%$ независимо от вида смолы, типа волокна или способа обработки его поверхности. После формообразования связующего в технологическом пакете остаются захваченные воздушные пузырьки, что приводит к потенциально высокой пористости ($>1\%$) [21–24].

Таким образом, для успешной реализации требуемых характеристик ПКМ, в первую очередь снижения пористости, необходимы методы, обеспечивающие условия для оптимального вакуумирования препрега. Снизить пористость позволяют варьирование схемы нанесения для подачи связующего на волокнистый наполнитель, корректировка режимов при переработке препрегов (подбор температур для вакуумных подформовок выложенных слоев препрега и режима отверждения), применение различных схем сборки и укладки технологического материала в вакуумном пакете.

Результаты и обсуждение

Разработано множество способов, позволяющих существенно улучшить качество изготавливаемых вакуумным формованием препрегов и пластиков на их основе. Например, авторы работы [25] исследовали зависимость пористости и прочностных характеристик *in situ* и предложили проводить два дополнительных цикла отверждения, что в итоге увеличило прочность ПКМ при растяжении на 26% . Недостатком рекомендуемого способа является более длительное время отверждения.

Среди методов подготовки вакуумного пакета традиционно используется сборка с одним вакуумным мешком, которая создает единую вакуумную среду для проведения предварительного вакуумирования. Этот метод можно использовать для изготовления изделий из ПКМ с плоской или сложной формой [26, 27].

Еще один способ – метод модифицированного одиночного вакуумного пакета – также подразумевает использование одного пакета для проведения вакуумирования, но нуждается в применении металлических или полимерных усилителей, уплотнительных листов или нажимных полос в углах сложных конструкций [28]. Мостиковый эффект в структурах сложной формы, где слои препрега не полностью соответствуют нужной форме, как раз предотвращается с помощью данного метода.

В методе двойного вакуумного пакета используют две вакуумные среды либо жесткую камеру [29, 30], что позволяет с большей вероятностью получить материал необходимого качества. При формовании ПКМ между обоими мешками поддерживается разница давлений для создания эффекта раздувания, т. е. 100 и 95 кПа для внешнего и внутреннего мешков соответственно. В этом случае приложение давления 100 кПа (максимальное значение) считается полным вакуумом, <100 кПа – частичным вакуумом. При этом используется парциальное давление 95 кПа во внутренней среде и полное давление 100 кПа во внешней среде при В-стадии для создания эффекта раздувания во внутренней среде. Это позволяет удалить захваченные летучие вещества (фаза дегазации). Следует принять во внимание, что внешний мешок продувается до 1 ат, а во внутренней среде создается полный вакуум для окончательной консолидации (фаза уплотнения).

Некоторые исследователи решили проблему недостаточного давления при изготовлении ПКМ методом VBO, предложив альтернативные способы создания избыточного давления, например использование мощных постоянных магнитов и формы для горячего прессования [31, 32]. Производство материалов с магнитной фиксацией позволяет

снизить затраты, связанные с приобретением, оснасткой и обслуживанием оборудования, по сравнению, например, с горячим прессованием. Однако основным недостатком этого процесса является то, что давление сжатия с использованием постоянных магнитов снижается экспоненциально при увеличении толщины укладки, что уменьшает его эффективность при изготовлении более толстых ламинатов.

Другой технологией снижения пористости ПКМ является создание «дышащих» препрегов (семипрегов), т. е. частично пропитанных материалов, в которых остаются сухие волокна, называемые инженерными вакуумными каналами. Сами каналы при этом пропитываются при повышении температуры и расплавлении связующего. Такой подход позволил снизить пористость получаемых изделий с 5 % до практически нулевых значений. Таким образом удалось получить монолитные материалы, которые используются при изготовлении высокопрочных крупногабаритных конструктивных элементов авиационной техники различного назначения или, например, лопастей ветряных электрогенераторов [33, 34]. В настоящее время на мировом рынке существует огромное разнообразие семипрегов, которые производятся ведущими в отрасли композиционных материалов компаниями, такими как Hexcel, Cytac, Toray Industries Inc., Gurit Holding AG и др.

Для повышения надежности таких препрегов, особенно в случае проблематичности достижения устойчивого вакуума и при изготовлении нестандартных крупногабаритных изделий, разрабатываются новые технологии, обеспечивающие более стабильную дегазацию материалов. Так, разработаны частично пропитанные материалы либо с сухим волокном в виде каналов для удаления воздуха, либо с полностью сухим волокном, находящимся между пленками связующего. Удаление воздуха, захваченного между слоями препрегов во время процесса выкладки, обеспечит низкую пористость деталей, отвержденных VBO. Такие препреги имеют области как богатые смолой, так и сухие [35, 36]. Захваченные газы мигрируют к краям углепластика во время вакуумных подформовок, при повышении температуры смола заполняет каналы, в результате чего обеспечивается изготовление материала без пор. Захваченные газы должны иметь возможность выходить через ламинат препрега в дренаж, поэтому граница вакуумной сборки должна быть проницаемой, соединять вакуумный насос и технологический пакет с препрегом без избыточного потока смолы. Кроме того, важно наличие инженерных перемычек (фитилей) по краям для обеспечения дегазации. Для разделения углепластика и проницаемой мембраны (при ее использовании) можно применять разделительные пленки (перфорированные или неперфорированные) или дополнительные проницаемые слои. Зачастую семипреги рассматривают как материалы с непостоянным распределением связующего, что улучшает проницаемость в толще изделия и увеличивает надежность процесса в сравнении с получением аналогичных вакуумных препрегов [37–39]. Обычно при изготовлении изделий к таким материалам добавляют поверхностный слой связующего для придания лучшей финишной поверхности. Использование таких препрегов также позволяет сократить продолжительность выкладки изделий по сравнению с аналогичными препрегами и в некоторых случаях улучшить драпируемость заготовок.

Дефекты, возникающие при производстве в автоклаве, можно устранить при проведении безавтоклавного процесса, поскольку отверждение препрега в этом случае происходит при низком давлении. Даже композиты с сотовым наполнителем могут быть отверждены таким образом, в отличие от автоклавирования, при котором материал разрушается под действием высокого давления. Интересно, что общую стоимость изделий можно сократить на ~25 % с помощью процессов безавтоклавного формования препрегов и семипрегов ввиду его простоты и дешевизны в применении [40].

Существует также ряд технологических проблем при производстве ПКМ сложной формы. Наиболее частой проблемой является отклонение толщин угловых и центральных областей в пластиках сложной формы [41, 42]. При этом самые высокие градиенты толщины (утолщение или утончение углов) зависят от ориентации слоев и кривизны форм. Дефекты, вызванные производством, могут усугубиться с увеличением размеров деталей и геометрической сложности.

Однородность толщины в угловых областях и центральной части является общепринятой характеристикой качества для изделий из ПКМ сложной формы, поскольку ее легко контролировать [43–45]. Основной причиной изменения толщины композитов со сложной структурой является разница в возникающем давлении, действующем на угловые и центральные области. Исследования показали, что разнотолщинность возникает главным образом из-за разных коэффициентов линейного теплового расширения матрицы и волокна при переработке препрегов. Деформация материала напоминает эффект пружины и, соответственно, называется пружинным эффектом. Пружинный эффект в конечном изделии создает проблемы при окончательной сборке из-за плохой посадки с сопрягаемыми конструкциями, что обычно устраняется при проектировании расчетной компенсацией. Определенные характеристики материалов, такие как анизотропия механических свойств в процессе отверждения, также являются причиной пружинного эффекта. Предполагается, что на пружинный эффект влияют как внутренние, так и внешние параметры. Внутренние параметры – это физические характеристики ПКМ, тогда как внешние – связаны с производственным процессом и используемой оснасткой. Из-за возникновения остаточных напряжений и искажений на пружинный эффект композитных ламинатов также влияет взаимодействие оснастки и изготавливаемой детали. Металлические оснастки расширяются больше, чем ПКМ во время отверждения, в свою очередь вызывая изменение размеров полимерного материала [46, 47].

Несмотря на некоторые уже успешно решаемые технологические сложности, в настоящее время широкий спектр препрегов и семипрегов сертифицирован для использования в аэрокосмическом производстве. В зависимости от используемого связующего эти препреги часто можно отверждать при более низких температурах в обычном термощафу, что позволяет значительно сократить общую стоимость получаемых изделий.

Наиболее широкое применение безавтоклавное формование препрегов и семипрегов нашло в зарубежной аэрокосмической отрасли. Реализованы многие проекты, в которых эти материалы используются такими крупными разработчиками и потребителями ПКМ, как Lockheed Martin, Boeing, NASA, а также крупные проекты, финансируемые фондом DARPA, при изготовлении разнообразных (в том числе и высоконагруженных) элементов для аэрокосмической отрасли как военного, так и гражданского назначения [48].

В последние 20 лет в отечественной промышленности эпоксидные связующие и материалы на их основе нашли ограниченное применение для вакуумного формования ПКМ из препрегов, несмотря на то, что впервые они начали применяться еще в СССР. Однако в последние годы появились связующие и препреги на их основе отечественного производства, пригодные для вакуумного формования, разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «ИНУМиТ», АО «Препрег-СКМ». Это свидетельствует о начале использования перспективных безавтоклавных технологий для производства изделий из ПКМ и в нашей стране [49, 50].

Заключения

Технология вакуумного формования препрегов развивается в настоящее время быстрыми темпами и может существенно снизить стоимость процесса изготовления

крупногабаритных и сложнопрофильных изделий с сохранением высокого уровня их свойств. Однако недостаточное уплотнение с помощью вакуумного мешка приводит к более высокой склонности к образованию пор и расслоений по сравнению с традиционным отверждением в автоклаве. Таким образом, для успешной реализации требуемых характеристик ПКМ, в первую очередь снижения пористости, необходимы глубокое понимание схемы организации оптимальной сборки вакуумного пакета, правильный выбор связующего, отвечающего требованиям использования именно в вакуумном формовании, необходимой продолжительности предварительного вакуумирования и температурного режима отверждения материала. Кроме того, реальными инструментами для получения низкопористого пластика являются варьирование схемы нанесения связующего на волокнистый наполнитель, а также применение различных схем укладки технологического материала.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерства) в рамках Соглашения № 075-11-2024-007 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04 июля 2023 г. об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions // Applied Composite Materials. 2010. Vol. 17. Is. 2. P. 63–67.
5. Lachaud F., Espinosa C., Michel L. et al. Modelling strategies for predicting the residual strength of impacted composite aircraft fuselages // Applied Composite Materials. 2015. Vol. 22. Is. 6. P. 599–621.
6. Alderliesten R.C. Critical review on the assessment of fatigue and fracture in composite materials and structures // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 35. Is. 15. P. 370–379.
7. Grunenfelder L.K., Dills A., Centea T., Nutt S.R. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2017. Vol. 93. P. 88–99.
8. Aleksendri D., Carlone P., Cirovic V. Optimization of the temperature-time curve for the curing process of thermoset matrix composites // Applied Composite Materials. 2016. Vol. 23. Is. 5. P. 1047–1063.
9. Bodaghi M., Cristovao C., Gomes R., Correia N.C. Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Vol. 82. P. 88–99.
10. Marsh G. De-autoclaving prepreg processing // Plast Reinforced plastics. 2012. Vol. 56. Is. 5. P. 20–25.

11. Xu X., Wang X., Liu W. et al. Microwave curing of carbon fiber/bismaleimide composite laminates: material characterization and hot-pressing pretreatment // *Materials and Design*. 2016. Vol. 97. Is. 5. P. 316–323.
12. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepregs – effect of dissolved moisture // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. Is. 16. P. 2304–2309.
13. Helmus R., Centea T., Hubert P., Hinterhölzl R. Out-of-autoclave prepreg consolidation: coupled air evacuation and prepreg impregnation modeling // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50. Is. 10. P. 1403–1413.
14. Garschke C., Weimer C., Parlevlie P.P., Fox B.L. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012. Vol. 43. Is. 6. P. 935–944.
15. Han K., Jiang S., Zhang C., Wang B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000. Vol. 31. Is. 1. P. 79–86.
16. Li W., Krehl J., Gillespie J.W. et al. Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process // *Journal of Composite Materials*. 2004. Vol. 38. Is. 20. P. 1803–1814.
17. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 70. P. 132–154.
18. Turner T.A., Harper L.T., Warrior N.A., Rudd C.D. Low-cost carbon-fibre-based automotive body panel systems: a performance and manufacturing cost comparison // *Proceedings IMechE. Part D: Journal Automobile Engineering*. 2006. Vol. 222. P. 53–62.
19. Murray J.J., Pappa E.J., Mamalis D. et al. Characterisation of carbon fibre reinforced powder epoxy composites for wind energy blades // *ECCM18: 18th European Conference on Composite Materials*. Athens, 2018. Art. 5.03-02.
20. Boyd J., Maskell R.K. Product design for low cost manufacturing of composites for aerospace applications // *Proceedings SAMPE conference*. California, 2001. P. 59–90.
21. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. P. 536.
22. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Коротков И.А. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 2 (50). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8.
23. Караваев Р.Ю., Городилова Н.А., Донецкий К.И. Изготовление полимерных композиционных материалов на основе семипрегов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 5 (123). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.
24. Хрульков А.В., Караваев Р.Ю., Городилова Н.А., Донецкий К.И. Некоторые причины образования пор в полимерных композиционных материалах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 6 (124). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.
25. Takagaki K., Hisada S., Minakuchi S., Takeda N. Process improvement for out-of-autoclave prepreg curing supported by in-situ strain monitoring // *Journal of Composite Materials*. 2017. Vol. 51. P. 1225–1237.
26. Dong A., Zhao Y., Zhao X., Yu Q. Cure Cycle Optimization of Rapidly Cured Out-Of-Autoclave Composites // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 421.
27. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1998. Vol. 17. P. 286–318.
28. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs // *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. P. 2016–2025.
29. Sherwin G.R. Non-autoclave processing of advanced composite repairs // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1999. Vol. 19. P. 155–159.

30. Mujahid Y., Sallih N., Abdullah M.Z. A Comparison of Single-Vacuum-Bag and Double-Vacuum-Bag Methods for Manufacturing High-Quality Laminated Composites // Conference paper «Advances in Manufacturing Engineering». New York: Springer, 2020. P. 457–467.
31. Pishvar M., Amirkhosravi M., Altan M.C. Magnet assisted composite manufacturing: A novel fabrication technique for high-quality composite laminates // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. P. 159–169.
32. Amirkhosravi M., Pishvar M., Altan M.C. Improving laminate quality in wet lay-up/vacuum bag processes by magnet assisted composite manufacturing (MACM) // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 98. P. 227–237.
33. Grunenfelder L.K., Centea T., Hubert P., Nutt S.R. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 45. P. 119–126.
34. Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
35. Martinez P., Jin B.C., Nutt S. Droplet Spreading on Unidirectional Fiber Beds // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. P. 13–15.
36. Schechter S.G.K., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Air evacuation and resin impregnation in semi-prepregs: effects of feature dimensions // *Advanced manufacturing: polymer & composites science*. 2020. Vol. 6. Is. 2. P. 101–114.
37. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Through thickness air permeability of prepregs during cure // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40. P. 1587–1596.
38. Edwards W.T., Martinez P., Nutt S.R. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2020. Vol. 6. Is. 4. P. 198–211.
39. Frost M., Solanki D., Mills A. Resin film infusion processing of carbon fibre composite automotive body panels // *SAMPE Journal*. 2003. Vol. 39. Is. 4. P. 44–49.
40. A kind of phenolic aldehyde panel honeycomb sandwich construction part forming method: pat. CN106608056B; appl. 21.11.16; publ. 03.05.17.
41. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs // *Polymer Composites*. 2017. Vol. 38. P. 2016–2025.
42. Levy A., Hubert P. Vacuum-bagged composite laminate forming processes: Predicting thickness deviation in complex shapes // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 126. P. 105568.
43. Naji M.I., Hoa S.V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: Curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution // *Journal of composite materials*. 2000. Vol. 34. P. 1710–1755.
44. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1998. Vol. 17. P. 286–318.
45. Gu Y., Li M., Li Y., Zhang Z. Pressure transfer behaviour of rubber mould and the effects on consolidation of L-shape composite laminates // *Polymers and Polymer Composites*. 2010. Vol. 18. P. 167–174.
46. Hein R., Prussak R., Schmidt J. Phenomenological Analysis of Thermo-Mechanical-Chemical Properties of GFRP during Curing by Means of Sensor Supported Process Simulation // *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 192.
47. Zappino E., Zobeiry N., Petrolo M. et al. Analysis of process-induced deformations and residual stresses in curved composite parts considering transverse shear stress and thickness stretching // *Composite Structures*. 2020. Vol. 241. P. 112057.
48. Fiorina M., Seman A., Castanié B. et al. Spring-in prediction for carbon/epoxy aerospace composite structure // *Composite Structures*. 2017. Vol. 168. P. 739–745.
49. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

50. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

References

1. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
2. 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.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in creating new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions. *Applied Composite Materials*, 2010, vol. 17, is. 2, pp. 63–67.
5. Lachaud F., Espinosa C., Michel L. et al. Modelling strategies for predicting the residual strength of impacted composite aircraft fuselages. *Applied Composite Materials*, 2015, vol. 22, is. 6, pp. 599–621.
6. Alderliesten R.C. Critical review on the assessment of fatigue and fracture in composite materials and structures. *Engineering Failure Analysis*, 2013, vol. 35, is. 15, pp. 370–379.
7. Grunenfelder L.K., Dills A., Centea T., Nutt S.R. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 93, pp. 88–99.
8. Aleksendri D., Carlone P., Cirovic V. Optimization of the temperature-time curve for the curing process of thermoset matrix composites. *Applied Composite Materials*, 2016, vol. 23, is. 5, pp. 1047–1063.
9. Bodaghi M., Cristovao C., Gomes R., Correia N.C. Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, vol. 82, pp. 88–99.
10. Marsh G. De-autoclaving prepreg processing. *Plast Reinforced plastics*, 2012, vol. 56, is. 5, pp. 20–25.
11. Xu X., Wang X., Liu W. et al. Microwave curing of carbon fiber/bismaleimide composite laminates: material characterization and hot-pressing pretreatment. *Materials and Design*, 2016, vol. 97, is. 5, pp. 316–323.
12. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepreps – effect of dissolved moisture. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, is. 16, pp. 2304–2309.
13. Helmus R., Centea T., Hubert P., Hinterhölzl R. Out-of-autoclave prepreg consolidation: coupled air evacuation and prepreg impregnation modeling. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 50, is. 10, pp. 1403–1413.
14. Garschke C., Weimer C., Parlevlie P.P., Fox B.L. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, vol. 43, is. 6, pp. 935–944.
15. Han K., Jiang S., Zhang C., Wang B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, vol. 31, is. 1, pp. 79–86.
16. Li W., Krehl J., Gillespie J.W. et al. Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process. *Journal of Composite Materials*, 2004, vol. 38, is. 20, pp. 1803–1814.
17. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepreps – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 70, pp. 132–154.

18. Turner T.A., Harper L.T., Warrior N.A., Rudd C.D. Low-cost carbon-fibre-based automotive body panel systems: a performance and manufacturing cost comparison. *Proceedings IMechE. Part D: Journal Automobile Engineering*, 2006, vol. 222, pp. 53–62.
19. Murray J.J., Pappa E.J., Mamalis D. et al. Characterisation of carbon fibre reinforced powder epoxy composites for wind energy blades. *ECCM18: 18th European Conference on Composite Materials*. Athens, 2018, art. 5.03-02.
20. Boyd J., Maskell R.K. Product design for low cost manufacturing of composites for aerospace applications. *Proceedings SAMPE conference*. California, 2001, pp. 59–90.
21. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019, 536 p.
22. Dushin M.I., Donetskii K.I., Karavaev R.Y., Korotkov I.A. Some features of liquid formation of polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2017, no. 2 (50), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8.
23. Karavaev R.Yu., Gorodilova N.A., Donetskii K.I. Production of polymer composite materials based on semipregs. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.
24. Hrulkov A.V., Karavaev R.Yu., Gorodilova N.A., Donetskii K.I. Some causes of voids formation in polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.
25. Takagaki K., Hisada S., Minakuchi S., Takeda N. Process improvement for out-of-autoclave prepreg curing supported by in-situ strain monitoring. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 51, pp. 1225–1237.
26. Dong A., Zhao Y., Zhao X., Yu Q. Cure Cycle Optimization of Rapidly Cured Out-Of-Autoclave Composites. *Materials*, 2018, vol. 11, p. 421.
27. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, vol. 17, pp. 286–318.
28. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only preregs. *Polymer Composites*, 2017, vol. 38, pp. 2016–2025.
29. Sherwin G.R. Non-autoclave processing of advanced composite repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, vol. 19, pp. 155–159.
30. Mujahid Y., Sallih N., Abdullah M.Z. A Comparison of Single-Vacuum-Bag and Double-Vacuum-Bag Methods for Manufacturing High-Quality Laminated Composites. *Conference paper «Advances in Manufacturing Engineering»*. New York: Springer, 2020, pp. 457–467.
31. Pishvar M., Amirkhosravi M., Altan M.C. Magnet assisted composite manufacturing: A novel fabrication technique for high-quality composite laminates. *Polymer Composites*, 2019, vol. 40, pp. 159–169.
32. Amirkhosravi M., Pishvar M., Altan M.C. Improving laminate quality in wet lay-up/vacuum bag processes by magnet assisted composite manufacturing (MACM). *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 98, pp. 227–237.
33. Grunenfelder L.K., Centea T., Hubert P., Nutt S.R. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 45, pp. 119–126.
34. *Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom*: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
35. Martinez P., Jin B.C., Nutt S. Droplet Spreading on Unidirectional Fiber Beds. *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, pp. 13–15.
36. Schechter S.G.K., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Air evacuation and resin impregnation in semi-pregs: effects of feature dimensions. *Advanced manufacturing: polymer & composites science*, 2020, vol. 6, is. 2, pp. 101–114.
37. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Through thickness air permeability of preregs during cure. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40, pp. 1587–1596.

38. Edwards W.T., Martinez P., Nutt S.R. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, vol. 6, is. 4, pp. 198–211.
39. Frost M., Solanki D., Mills A. Resin film infusion processing of carbon fibre composite automotive body panels. *SAMPE Journal*, 2003, vol. 39, is. 4, pp. 44–49.
40. A kind of phenolic aldehyde panel honeycomb sandwich construction part forming method: pat. CN106608056B; appl. 21.11.16; publ. 03.05.17.
41. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs. *Polymer Composites*, 2017, vol. 38, pp. 2016–2025.
42. Levy A., Hubert P. Vacuum-bagged composite laminate forming processes: Predicting thickness deviation in complex shapes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, p. 105568.
43. Naji M.I., Hoa S.V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: Curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution. *Journal of composite materials*, 2000, vol. 34, pp. 1710–1755.
44. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, vol. 17, pp. 286–318.
45. Gu Y., Li M., Li Y., Zhang Z. Pressure transfer behaviour of rubber mould and the effects on consolidation of L-shape composite laminates. *Polymers and Polymer Composites*, 2010, vol. 18, pp. 167–174.
46. Hein R., Prussak R., Schmidt J. Phenomenological Analysis of Thermo-Mechanical-Chemical Properties of GFRP during Curing by Means of Sensor Supported Process Simulation. *Processes*, 2020, vol. 8, p. 192.
47. Zappino E., Zobeiry N., Petrolo M. et al. Analysis of process-induced deformations and residual stresses in curved composite parts considering transverse shear stress and thickness stretching. *Composite Structures*, 2020, vol. 241, p. 112057.
48. Fiorina M., Seman A., Castanié B. et al. Spring-in prediction for carbon/epoxy aerospace composite structure. *Composite Structures*, 2017, vol. 168, pp. 739–745.
49. Slavin A.V., Donetskiy K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
50. Tkachuk A.I., Donetskiy K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

Информация об авторах

Ткачук Александр Игоревич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кузнецова Полина Андреевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Донецкий Кирилл Игоревич, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Караваяев Роман Юрьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander I. Tkachuk, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Polina A. Kuznetsova, First Category Technician, Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Kirill I. Donetskiy, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Roman Yu. Karavaev, Head of Sector, Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.11.2024.
The article was submitted 13.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.11.2024.

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-56-65

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКА РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ РАСПЛАВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ВСЭ-1212

А.В. Гамазина¹, А.О. Курносов¹, М.И. Вавилова¹, Н.Р. Кочетов¹

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

Аннотация. Рассмотрены свойства различных типов стеклянных наполнителей. Описаны основные характеристики расплавно-эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212. Приведены результаты исследования смачиваемости волокна кварцевого наполнителя. Исследованы образцы стеклопластика методом ультразвукового контроля. Приведены физико-механические и диэлектрические характеристики стеклопластика марки ВПС-48/7781-14. Исследован разработанный стеклопластик радиотехнического назначения на основе кварцевого наполнителя и расплавно-эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, кварцевое волокно, расплавно-эпоксидное связующее, вакуум-автоклавное формование, стеклопластик, упруго-прочностные характеристики, диэлектрические характеристики

Для цитирования: Гамазина А.В., Курносов А.О., Вавилова М.И., Кочетов Н.Р. Исследование свойств стеклопластика радиотехнического назначения на основе расплавно-эпоксидного связующего ВСЭ-1212 // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-56-65.

Scientific article

INVESTIGATION OF FIBERGLASS PROPERTIES BASED ON THE MELT BINDER VSE-1212 FOR RADIO ENGINEERING PURPOSES

A.V. Gamazina¹, A.O. Kurnosov¹, M.I. Vavilova¹, N.R. Kochetov¹

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

Abstract. The properties of various types of glass filler are considered. The main characteristics of a molten epoxy binder VSE-1212 are described. Studies of the wettability of quartz filler fibers are presented. Fiberglass samples were examined by ultrasonic inspection. The results of the physico-mechanical and dielectric characteristics of fiberglass of the VPS-48/7781-14 are presented. The results of the research of the developed fiberglass for radio engineering purposes based on quartz filler and molten epoxy binder VSE-1212 are presented.

Keywords: polymer composite materials, quartz fiber, molten epoxy binder, vacuum autoclave molding, fiberglass, elastic-strength characteristics, dielectric characteristics

For citation: Gamazina A.V., Kurnosov A.O., Vavilova M.I., Kochetov N.R. Investigation of fiberglass properties based on the melt binder VSE-1212 for radio engineering purposes. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-56-65.

Введение

Развитие промышленности определяет необходимость в создании и применении высокотехнологичных изделий из новых материалов с улучшенными свойствами. Важной задачей является разработка новых авиационных материалов, соответствующих современным требованиям и стандартам. Разработанные материалы должны обладать высоким уровнем упруго-прочностных характеристик для обеспечения эксплуатационной стабильности. Кварцевое волокно, которое используется при изготовлении препрега и далее в разработке стеклопластика на его основе, имеет высокие значения прочности, термической стойкости и низкие показатели диэлектрических характеристик. К настоящему времени синтезировано значительное количество связующих на основе эпоксидных олигомеров. Эпоксидные смолы отличаются высокими показателями ударной прочности, твердости и износостойкости. Они обладают значительной температуро- и теплостойкостью. Таким образом, совместив эти составляющие, можно разработать новые виды полимерных композиционных материалов (ПКМ) с широким спектром улучшенных свойств [1–4].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана широкая номенклатура конструкционных и функциональных ПКМ для применения в различных узлах и агрегатах изделий авиационной техники.

В данной статье приведены основные физико-механические и диэлектрические характеристики ПКМ на основе кварцевого наполнителя, который характеризуется низким уровнем диэлектрических свойств, и расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212, рекомендуемого для применения в авиационной и ракетно-космической технике. Приведены результаты исследований влияния замасливателя (аппрета) кварцевого наполнителя на получение ПКМ с наименьшим содержанием воздушных включений.

Материалы и методы

Стеклопластики – это современные ПКМ, которые занимают лидирующие позиции по объему использования в авиационной и других отраслях промышленности. Они обладают особыми свойствами, которые делают их идеальным материалом для применения в области, где требуется сочетание прочности, легкости и хороших изоляционных характеристик. Они широко используются при производстве средне- и слабонагруженных элементов конструкций, панелей интерьера, конструкций радиотехнического назначения и других деталей для авиационной техники. Выбор конкретного материала зависит от технических требований к конечному изделию, условий эксплуатации и возможностей по их обработке. Для создания деталей и агрегатов с высоким уровнем физико-механических свойств и низкими диэлектрическими характеристиками, необходимыми для конструкций радиотехнического назначения, требуются материалы с минимальными значениями диэлектрической проницаемости.

Стеклопластики обычно создаются путем сочетания стекловолокон и полимеров. Стекловолокно придает материалу прочность и жесткость, в то время как полимеры обеспечивают удобство при обработке и формовке. Применение стеклопластиков позволяет создавать легкие, прочные и устойчивые конструкции, что особенно важно для авиационных материалов. Благодаря своей надежности и долговечности стеклопластики широко используются в производстве элементов, работающих в условиях высоких нагрузок и экстремальных температур.

Технологический процесс производства стеклопластиков включает несколько этапов, начиная с пропитки стекловолокна связующим и заканчивая формовкой и отверждением материала. Эти процессы требуют точной настройки и контроля для обеспечения высокого качества и надежности разработанного изделия [5–7].

В зависимости от вида полимерной матрицы и наполнителя, а также их объемного содержания в материале можно получить стеклопластики с различным уровнем упруго-прочностных и диэлектрических характеристик.

Стекланные волокна представляют собой материал, свойства которого в основном зависят от их состава. В зависимости от предназначения различают несколько типов стекланных волокон. Первый тип (*E*) является наиболее распространенным и отличается низкой электрической проводимостью, второй (*S*) – имеет высокую прочность (данные волокна необходимы для изготовления материала, который должен выдерживать высокие механические нагрузки, обеспечивая долговечность и надежность конструкций), третий (*AR*) – обладает повышенными значениями щелочестойкости, четвертый (*D*) – характеризуется низкой диэлектрической проницаемостью. Помимо перечисленных типов, существуют и другие разновидности стекланных волокон, каждая из которых обладает уникальными свойствами [7].

Прочностные свойства стекловолокон зависят от ряда ключевых факторов. Химический состав стекла определяет прочность материала. Наличие определенных добавок может улучшить механические характеристики стекловолокон. Кроме того, технология производства влияет на качество волокон – различные методы формования обеспечивают разные структуры и, соответственно, свойства материала. Важно учитывать наличие механических повреждений на поверхности волокон: даже небольшие дефекты могут значительно снизить прочность материала. Диаметр и длина волокон также имеют особое значение: увеличение диаметра волокна, как правило, сопровождается снижением прочности [8]. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики волокон.

Таблица 1

Физико-механические и диэлектрические характеристики стекловолокон

Характеристики	Значения характеристик для волокон типа				
	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>AR</i>	<i>D</i>	кварцевое
Температура размягчения, °C	830–860	1056	–	770	–
Температура плавления, °C	1066–1077	1500	1180–1200	–	1670
Плотность, г/см ³	2,5–2,6	2,4–2,5	2,6–2,7	2,2	2,2
Предел прочности при растяжении, МПа	3100–3500	4380–4590	3100–3500	2410	3400
Модуль упругости при растяжении, ГПа	76–78	88–91	72–74	52	69
Удлинение при растяжении, %	4,5–4,9	4,5–4,9	2,0–2,4	–	5
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ⁶ Гц	0,001	0,002	–	–	0,001
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц	5–6	4–5	–	3–4	3–4

Одним из основных применений кварцевых волокон является производство обтекателей для самолетов, которые не только обеспечивают аэродинамические свойства, но и защищают от воздействия внешних факторов. Кроме того, кварцевое волокно широко используется в производстве стеклопластика, где оно выступает в роли наполнителя. Этот материал пользуется большим спросом при создании изделий для радиотехнических целей [8, 9].

Кварцевое волокно получают из кристаллического кварца, который представляет собой модификацию кремнезема (SiO₂). Оно содержит не менее 99,95 % оксида кремния, что обеспечивает исключительные свойства. Высокая теплостойкость является одним из ключевых преимуществ кварцевого волокна. Оно способно выдерживать экстремально высокие температуры без деформации или разрушения. Эта особенность позволяет использовать его в высокотемпературных процессах, таких как производство стекла,

керамики, металлов, а также в космической отрасли. Кварцевое волокно также демонстрирует хорошие радиопрозрачные свойства. Благодаря низкой проводимости электричества оно широко используется в электротехнической промышленности для производства изоляционных материалов, высокочастотных кабелей, радиочастотных компонентов и других элементов, где требуется высокая степень изоляции. Теплофизические свойства кварцевого волокна также являются его сильной стороной. Оно обладает высокой теплопроводностью и низкой теплоемкостью, что делает его эффективным теплоизоляционным материалом. Химическая стойкость кварцевого волокна к воздействию агрессивных сред, таких как кислоты, щелочи, растворители, делает его ценным материалом для использования в химической промышленности. Оно устойчиво к коррозии и не подвержено разрушению под воздействием различных химических веществ. Кварцевое волокно также обладает высокими значениями упруго-прочностных характеристик, что делает его прочным и надежным материалом. Оно способно выдерживать высокие нагрузки без деформации и разрушения, что позволяет использовать его в конструкционных материалах, а также в производстве высокопрочных деталей для авиационной промышленности.

Однако высокая стоимость является основным недостатком кварцевого волокна, что ограничивает его широкое применение. В качестве альтернативы применяются стеклянные ткани на основе полых волокон, которые, хотя и уступают кварцевому волокну по ряду свойств, имеют значительно меньшую стоимость. Стеклянные ткани также обладают рядом преимуществ: высокой прочностью при растяжении и хорошей теплоизоляцией. В заключение можно отметить, что кварцевое волокно – это уникальный материал с широким спектром применения [10].

Для обеспечения соответствия ПКМ повышенным техническим требованиям необходимо использовать современные полимерные связующие с высоким уровнем физико-химических и технологических свойств [11].

В настоящее время широкое распространение получили эпоксидные смолы, которые позволяют создавать полимерные композиции с необходимыми реологическими и механическими характеристиками. Ключевой особенностью термореактивных связующих, к которым относятся эпоксидные смолы, является образование пространственной сетчатой структуры в результате химической реакции. Такая реакция происходит между би- или полифункциональными олигомерами (основными компонентами связующего) и низкомолекулярными веществами, называемыми отверждающими агентами. В итоге образуется жесткая неплавкая полимерная матрица, придающая композиту прочность и устойчивость к внешним воздействиям. В начальном состоянии жидкая смесь моно- или олигомеров с отверждающим агентом обладает низкой вязкостью. Это свойство позволяет легко пропитывать наполнители, формируя непрерывную матрицу. Отверждение может происходить при комнатной или повышенных температурах, что зависит от используемых компонентов и желаемых свойств материала. Полуфабрикаты, пропитанные смолой, называются препрегами. Они могут храниться в течение определенного времени в конкретных условиях, когда скорость отверждения полимерной матрицы минимальна. Этот период называется жизнеспособностью препрега и является ключевым фактором в технологии производства ПКМ.

Современные эпоксидные смолы предлагают широкий спектр возможностей для оптимизации свойств ПКМ:

- высокая прочность и жесткость – благодаря образованию плотной сетчатой структуры эпоксидные смолы придают ПКМ повышенную прочность при растяжении, изгибе и сжатии;
- высокая адгезия к материалам различной природы;
- стойкость к воздействию различных химических веществ, таких как кислоты, щелочи, растворители;
- водонепроницаемость;

– термостойкость, что позволяет использовать эпоксидные смолы для создания высокотемпературных ПКМ.

Кроме того, существует множество модификаторов эпоксидных смол, которые позволяют регулировать свойства материала в соответствии с конкретными требованиями: пластификаторы увеличивают гибкость и ударную прочность; наполнители изменяют механические свойства, плотность, теплопроводность, электропроводность и др.; сшивающие агенты увеличивают прочность и термостойкость.

Применение эпоксидных смол в производстве ПКМ открывает широкие возможности для создания высококачественных материалов с уникальными свойствами, отвечающих требованиям технических стандартов. В зависимости от типа наполнителя, модификаторов и технологии изготовления можно получить ПКМ с различными характеристиками [12, 13].

Связующее ВСЭ-1212 с высокими механическими и деформационными характеристиками, а также препреги на его основе обеспечивают возможность изготовления изделий с высоким уровнем упруго-прочностных свойств, устойчивых к воздействию неблагоприятных эксплуатационных факторов. Данное связующее состоит из модифицированной эпоксидной и полифункциональной смолы, аминного ароматического отвердителя и термопласта. Температура отверждения варьируется от 160 до 180 °С [14, 15].

Связующее марки ВСЭ-1212 относится к расплавному типу и не нуждается в использовании легколетучих растворителей, что в свою очередь повышает экологическую безопасность при производстве, а также способствует существенному снижению пористости, увеличению стойкости к ударным воздействиям элементов конструкций [16–18].

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан и паспортизован стеклопластик марки ВПС-48/7781-14 на основе расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и стеклоткани арт. 7781-14. Стеклопластик марки ВПС-48/7781-14 применяется для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе створок капота, обтекателя пилона, узлов реверсивного устройства мотогондолы двигателя ПД-14. Материал может эксплуатироваться при температурах от –60 до +120 °С и кратковременно до +150 °С. Разработанный стеклопластик имеет высокие упруго-прочностные характеристики, в том числе в условиях воздействия повышенных температур, влажности и различных агрессивных сред, но демонстрирует достаточно высокие значения диэлектрической проницаемости.

Разработка стеклопластика марки ВПС-48/ТС-8/3К на основе эпоксидного расплавного связующего марки ВСЭ-1212 и кварцевого армирующего наполнителя является актуальной задачей и позволит обеспечить создание средненагруженных элементов летательных аппаратов конструкционного и радиотехнического назначения.

На основе расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и кварцевой ткани ТС-8/3К-39 отработана технология изготовления препрега стеклопластика ВПС-48/ТС-8/3К на современной пропиточной машине, которая обеспечивает высокую точность и минимальный разброс значений массовых характеристик, а также экологичность и высокую культуру производства. На рис. 1 изображена пропиточная машина для изготовления препрега по расплавной технологии.



Рис. 1. Пропиточная машина для изготовления препрега по расплавной технологии

Расплавная технология изготовления препрега позволяет реализовать качественную пропитку наполнителя, минимизировать наличие газообразных продуктов и тем самым снизить пористость, а также повысить упруго-прочностные характеристики ПКМ.

Результаты и обсуждение

Для разработки стеклопластика радиотехнического назначения выбрана кварцевая ткань марок ТС-8/3К-ТО (термообработанная) и ТС-8/3К-39 (с силановым замасливателем 39). Исследована капиллярность кварцевых волокон тканей и их типовых менисков (рис. 2).

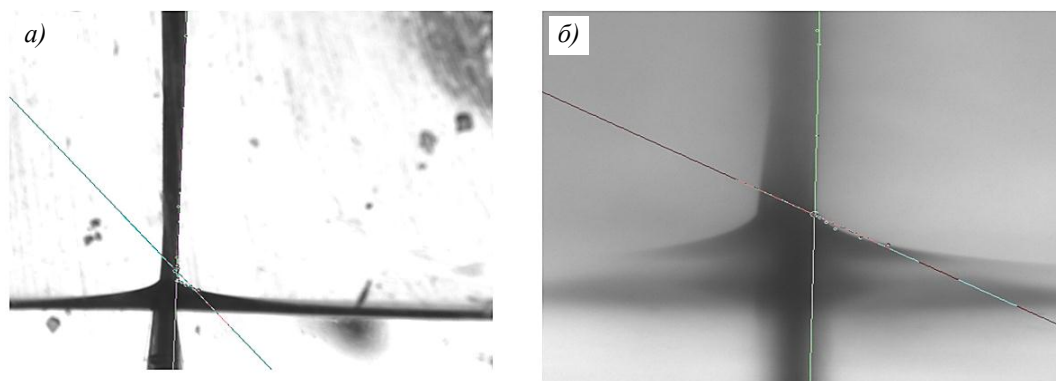


Рис. 2. Результаты исследований типовых менисков кварцевой ткани марок ТС-8/3К-ТО (а) и ТС-8/3К-39 (б)

Высота подъема уровня раствора дихромата калия для волокна марки ТС-8/3К-ТО составляет 10 мм, марки ТС-8/3К-39 – отсутствует. Для ткани марки ТС-8/3К-ТО угол типового мениска соответствует 42 градусам, ТС 8/3-К-39 – равен 68 градусам. Это влияет на отвержение матрицы (связующего) и наполнителя (кварцевой ткани).

Основным отличием кварцевой ткани ТС-8/3К-ТО от ТС-8/3К-39 является используемый замасливатель. В термообработанных тканях на этапе изготовления после вытяжки из расплава на поверхность волокон наносится парафиновая эмульсия, необходимая для защиты в процессе дальнейшей текстильной переработки. После процедуры изготовления полотна ткани образовавшаяся пленка парафина удаляется с поверхности путем термической обработки. Однако при работе с наполнителем марки ТС-8/3К-ТО зачастую можно наблюдать темные участки кварцевых нитей, что с учетом описанной процедуры получения может свидетельствовать о неполном удалении парафиновой эмульсии и продуктов ее термоокислительной деструкции. В связи с этим, а также с учетом того, что парафиновая эмульсия обладает гидрофобными свойствами, закономерно рассматривать тот факт, что наличие парафиновой эмульсии на поверхности снижает способность кварцевых волокон к смачиванию, что в конечном счете приводит к образованию пор в полимерной матрице ПКМ.

Кварцевая ткань марки ТС-8/3К-39, напротив, на этапе изготовления волокон покрывается активным замасливателем, содержащим поверхностно-активные вещества, повышающие смачиваемость волокон. В конечном счете использование замасливателя марки 39 обеспечивает лучшее распределение полимерного связующего по поверхности волокон кварцевого наполнителя и в процессе изготовления ПКМ обеспечивает минимальное количество воздушных включений в полимерной матрице.

Методом ультразвукового контроля исследованы плиты стеклопластиков, изготовленные методом вакуум-автоклавного формования (рис. 3).

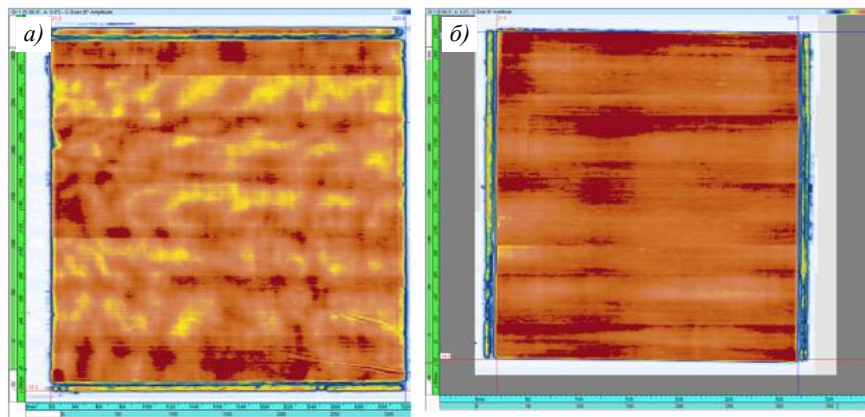


Рис. 3. Результаты исследований плит стеклопластика на основе кварцевой ткани ТС-8/3К-ТО (а) и ТС-8/3К-39 (б) методом ультразвукового контроля

Результаты ультразвукового контроля представлены в виде С-сканов донных эхосигналов, где каждому цвету от белого до бордового соответствует амплитуда эхосигнала от донной поверхности от минимального до максимального значения соответственно. При хорошем качестве плиты (низкой пористости) ультразвуковой сигнал проходит через материал, отражается от донной поверхности и возвращается обратно в преобразователь. При этом затухание ультразвукового сигнала минимально, а амплитуда отраженного от донной поверхности эхосигнала будет максимальна. На рис. 3, а наблюдается уменьшение амплитуды эхосигнала от донной поверхности, что может свидетельствовать о наличии повышенной пористости образца плиты стеклопластика на основе ткани марки ТС-8/3К-ТО. Проходя через участки повышенной пористости, ультразвуковой сигнал начинает дополнительно рассеиваться, соответственно в преобразователь будет возвращаться эхосигнал с меньшей амплитудой.

На рис. 3, б приведен С-скан плиты на основе ткани марки ТС-8/3К-39, который имеет практически равномерную максимальную амплитуду эхосигнала от всей донной поверхности плиты. Можно сделать вывод, что образец плиты стеклопластика на основе ткани ТС-8/3К-39 имеет минимальную пористость (близкую к нулю).

По результатам исследований для разработки стеклопластика на основе эпоксидного расплавленного связующего марки ВСЭ-1212 выбрана кварцевая ткань марки ТС-8/3К-39 с силановым замасливателем.

В табл. 2 приведены результаты сравнения физико-механических и диэлектрических характеристик стеклопластиков марок ВПС-48/ТС-8/3К и ВПС-48/7781-14.

Таблица 2

Физико-механические и диэлектрические характеристики стеклопластиков марок ВПС-48/ТС-8/3К и ВПС-48/7781-14

Характеристики	Значения характеристик для стеклопластика	
	ВПС-48/ТС-8/3К	ВПС-48/7781-14
Содержание связующего, % (по массе)	36–39	35–39
Плотность, г/см ³	1734–1744	1800–2000
Предел прочности при растяжении*, МПа	898–926	400–440
Модуль упругости при растяжении*, МПа	27–28	26–32
Предел прочности при сжатии*, МПа	530–690	550–640
Модуль упругости при сжатии*, МПа	31–35	24–28
Тангенс угла диэлектрических потерь**	0,011	0,011
Диэлектрическая проницаемость**	3,48–3,56	4,84
* При температуре 23±2 °С и направлении приложения нагрузки [0°].		
** При частоте 10 ¹⁰ Гц.		

Полученные результаты исследования подтверждают, что новый стеклопластик на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и кварцевой ткани ТС-8/3К-39 обладает высоким уровнем упруго-прочностных характеристик, сравнимым со свойствами ранее разработанного стеклопластика, изготовленного на основе стеклоткани арт. 7781-14. Новый стеклопластик демонстрирует высокие технические характеристики. Особенно следует отметить низкие значения диэлектрической проницаемости у образцов стеклопластика ВПС-48/ТС-8/3К, что указывает на потенциальное применение данного материала в различных радиотехнических конструкциях. Это открывает новые перспективы для использования разработанного стеклопластика в авиационной отрасли, где требуются материалы с низкой диэлектрической проницаемостью.

Таким образом, новый стеклопластик представляет собой перспективный материал, который может найти широкое применение в различных областях промышленности. Его высокие упруго-прочностные характеристики и низкая диэлектрическая проницаемость позволяют создавать легкие и прочные конструкции радиотехнического назначения изделий авиационной техники.

Заключения

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана широкая номенклатура ПКМ на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-1212, которые применяют для изготовления деталей и конструкций изделий авиационной техники.

Установлено, что пониженной пористостью обладает стеклопластик на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212 и кварцевой ткани марки ТС-8/3К-39. Следует отметить, что разработанный стеклопластик ВПС-48/ТС-8/3К на основе кварцевой ткани превосходит стеклопластик ВПС-48/7781-14 на основе конструкционной стеклоткани по следующим показателям: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, предел прочности, модуль упругости при сжатии.

Исходя из полученных значений диэлектрических характеристик, можно сделать вывод о возможности применения стеклопластика ВПС-48/ТС-8/3К в конструкциях радиотехнического назначения изделий авиационной техники.

Применение разработанного стеклопластика позволит обеспечить высокие технические характеристики элементов конструкций радиотехнического назначения и повысить показатели экологической безопасности производства путем использования безрастворной технологии изготовления препрега.

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

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. Гетьман А.А. Основные направления развития материаловедения для создания новой техники // Арматуростроение. 2021. № 4 (133). С. 48–51.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
5. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-344-348.
6. 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.

7. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
8. Гутников С.И., Лазорак Б.И., Селезнев А.Н. *Стекланные волокна: учеб. пособие*. М.: МГУ, 2010. 53 с.
9. Батаев А.А., Батаев В.А. *Композиционные материалы*. М.: Логос, 2006. 400 с.
10. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стекланных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 3. С. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.
11. Бородулин А.С. Свойства и особенности структур стекланных волокон, используемых для изготовления стеклопластиков // *Материаловедение*. 2012. № 7. С. 34–37.
12. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоматического формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (70). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
13. Буров А.К., Андреевская Г.Д. *Высокопрочные стеклопластики: учеб. пособие*. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 72 с.
14. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. *Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.
15. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
16. Ткачук А.И., Гуревич Я.М., Гусева М.А., Мишуров К.С. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения эпоксидного связующего ВСЭ-1212, перерабатываемого по препреговой технологии // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2018. № 4. С. 29–34.
17. Загора А.Г., Ткачук А.И., Терехов И.В., Мухаметов Р.Р. Методы химической модификации эпоксидных олигомеров (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 7 (101). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6064-2021-0-7-73-85.
18. Дорошенко Ю.Е., Лебедева Е.Д. *Связующие для композиционных материалов*. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. 56 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Getman A.A. Main directions of development of materials science for the creation of new technology. *Armaturostroenie*, 2021, no. 4 (133), pp. 48–51.
3. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
4. Kablov E.N. Main results and directions of development of materials for advanced aviation technology. 75 years. *Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 20–26.
5. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-344-348.
6. 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.
7. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.

8. Gutnikov S.I., Lazoryak B.I., Seleznev A.N. *Glass fibers: textbook*. Moscow: Moscow State Univ., 2010, 53 p.
9. Bataev A.A., Bataev V.A. *Composite materials*. Moscow: Logos, 2006, 400 p.
10. Vavilova M.I., Kavun N.S. The properties of glass filler for constructions of fiberglass. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.
11. Borodulin A.S. Properties and features of the structures of glass fibers used for the production of fiberglass. *Materialovedenie*, 2012, no. 7, pp. 34–37.
12. Tkachuk A.I., Donetsk K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
13. Burov A.K., Andreevskaya G.D. *High-strength fiberglass: textbook*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1958, 72 p.
14. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, 528 p.
15. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
16. Tkachuk A.I., Gurevich Ya.M., Guseva M.A., Mishurov K.S. Technological and operational characteristics and areas of application of the epoxy binder VSE-1212, processed using prepreg technology. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 29–34.
17. Zagora A.G., Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Mukhametov R.R. Methods of chemical modification of epoxy oligomers (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6064-2021-0-7-73-85.
18. Doroshenko Yu.E., Lebedeva E.D. *Binders for composite materials*. Moscow: Mendeleyev Univ. of Chemical Technology of Russia, 2003, 56 c.

Информация об авторах

Гамазина Александра Васильевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Курносков Артем Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Вавилова Мария Ивановна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Кочетов Николай Романович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexandra V. Gamazina, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Maria I. Vavilova, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay R. Kochetov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.08.2024.
The article was submitted 21.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 26.08.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-66-74

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ

Ю.И. Судьин¹, Р.К. Салахова¹, Ан.Р. Галиуллин¹, Р.С. Савицкий¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований поверхностного натяжения расплавленного клеевого связующего марки ВСК-14-6 при помощи процессорного тензиометра. В результате измерения краевых углов смачивания в тестовых жидкостях получены расчетные значения свободных энергий поверхностей исследуемых твердых тел (полимерсотопласт и углеродное волокно UMT42S-3K-EP), в том числе и после обработки плазмой атмосферного давления. Полученные величины свободной энергии поверхности использованы при оценке смачивающей способности твердых тел и адгезии их к связующему.

Ключевые слова: трехслойная сотовая панель, сотовый наполнитель, углеродное волокно, клеевое связующее, краевой угол смачивания, метод Вашбурна, плазма атмосферного давления, адгезия

Для цитирования: Судьин Ю.И., Салахова Р.К., Галиуллин Ан.Р., Савицкий Р.С. Исследование поверхностно-энергетических характеристик элементов трехслойных сотовых панелей // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-66-74.

Scientific article

STUDY OF SURFACE-ENERGY CHARACTERISTICS OF ELEMENTS OF THREE-LAYER HONEYCOMB PANELS

Yu.I. Sudin¹, R.K. Salakhova¹, An.R. Galiullin¹, R.S. Savitsky¹

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 research of surface tension of melt adhesive binder VSK-14-6 using a processor tensiometer are presented. As a result of measuring the wetting edge angles in test liquids, the calculated values of surface free energies (SFE) of the studied solids (polymer-sotoplastic and carbon fiber UMT42S-3K-EP) were obtained, including after treatment with atmospheric pressure plasma. The obtained SFE values were used to evaluate the wetting ability of the solids and their adhesion to the binder.

Keywords: three-layer honeycomb panel, honeycomb filler, carbon fiber, edge wetting angle, Washburne method, atmospheric pressure plasma, adhesion

For citation: Sudin Yu.I., Salakhova R.K., Galiullin An.R., Savitsky R.S. Study of surface-energy characteristics of elements of three-layer honeycomb panels. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-66-74.

Введение

В настоящее время разработки, связанные с авиационной промышленностью, сложно представить без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), широкое использование которых связано, прежде всего, с сочетанием таких уникальных свойств, как высокая прочность, жесткость, низкая масса и коррозионная стойкость [1]. В конструкции современных летательных аппаратов широко используются ПКМ, а в некоторых случаях их суммарная доля от общего объема применяемых материалов составляет >60 % [2]. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России [3, 4]. Одна из важнейших задач, которую в первую очередь можно разрешить с помощью ПКМ, – увеличение весовой эффективности конструкций. Рассматривать данную задачу особенно важно для конструкций, составляющих существенную часть летательного аппарата. К этим изделиям можно отнести панели пола современных пассажирских самолетов, которые представляют собой конструкции, состоящие, как правило, из двух несущих слоев (обшивок) и сотового заполнителя, расположенного между обшивками. Структурным элементом трехслойной конструкции является также опционально добавляемый адгезионный слой и полимерный сферопласт-заполнитель для заделки торцов панелей пола и заполнения зон установки крепежных элементов. До активного внедрения ПКМ панели пола изготавливали в виде трехслойной конструкции с обшивками из фанеры, стеклопластика (КАСТ-В), алюминия и с заполнителем в виде пенопласта или алюминиевых сот [5]. Средняя масса 1 м² подобных панелей пола варьируется от 4,2 до 5,6 кг в зависимости от места установки в самолете. Использование ПКМ нового поколения позволяет добиться среднего снижения массы 1 м² панелей пола на ~(1,8–2,1) кг.

В отечественном авиастроении принято подразделять панели пола на четыре основных типа по зонам их расположения в воздушном судне: I тип – подкресельные, II тип – зона проходов, III тип – зона входов-выходов и кухни, IV тип – зона багажного отсека. К каждому из типов предъявляются особые требования по физико-механическим, габаритно-массовым и пожаробезопасным характеристикам, которые обуславливаются в основном позонной эксплуатационной нагрузкой, конструктивными особенностями воздушного судна и стремлением к обеспечению безопасности людей и минимизации материального ущерба.

Следует упомянуть, что конструктивно-силовые схемы панелей пола могут быть как силовыми (воспринимающими нагрузку через каркас), так и не участвующими в распределении напряжений, т. е. в виде настила. В настоящее время внимание разработчиков современных воздушных судов направлено именно на силовую составляющую панелей пола, ввиду чего материалы и конструктивные решения, применяемые ранее для панелей пола в виде настила, не соответствуют требованиям к механическим свойствам для новых панелей пола [6]. Примером подобной ситуации могут служить заготовки панелей пола разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для самолета Ил-114, которые используются в качестве настила [7].

За последние десять лет на различных предприятиях отрасли ведутся работы по созданию отечественных панелей пола для современных самолетов – например, Ил-114-300, SSJ New и MC-21. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в 2021 г. в рамках импортозамещения завершена научно-исследовательская работа, направленная на замену заготовок панелей пола типа UNS производства фирмы AIM Altitude UK Ltd на аналогичные отечественные заготовки производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Создание материалов нового поколения, разработка и внедрение импортозамещающих технологий – один из путей для осуществления суверенитета России в условиях

перехода страны к шестому технологическому укладу [8, 9]. Государственная политика импортозамещения в области гражданского авиастроения РФ ставит новые задачи по разработке заготовок панелей пола, состоящих из отечественных компонентов. Значение подобных работ велико для предприятий, эксплуатирующих самолетную технику, так как после введения западными странами всеобъемлющих запретительных санкций усложнилась либо вовсе прекратилась доставка материалов, комплектующих и деталей для иностранных воздушных судов [10]. При проведении технического обслуживания и ремонта такой техники нередко требуется полная замена панелей пола, однако сделать это в настоящее время достаточно проблематично. Для разрешения сложившейся ситуации организациям, эксплуатирующим авиационную технику, необходимо создание собственного производства панелей пола или приобретение уже готового решения. Тем не менее в обоих случаях они вынуждены будут столкнуться со сложностями при сертификации отечественных панелей пола для иностранных воздушных судов.

С учетом вышеприведенных аргументов можно видеть, что разработка отечественных заготовок панелей пола под конструктивно-силовую схему современного самолета и по настоящее время остается важной задачей. На данный момент ориентиром при разработке таких заготовок, предназначенных для силовых конструкций современных самолетов (например, для МС-21) являются заготовки панелей пола фирмы Gill, имеющие высокий уровень физико-механических свойств, а именно таких, как усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, которое характеризует качество склеивания основных элементов трехслойной панели друг с другом [11].

На усилие отслаивания обшивки влияет достаточно большое количество факторов. Однако при создании ПКМ основное значение для обеспечения необходимых свойств композита имеет сродство используемых материалов, определяемое и зависящее главным образом от поверхностно-энергетических характеристик компонентов таких материалов.

Цель данной работы – оценка адгезии твердых материалов (сотового заполнителя и углеволокна) к расплавному клеевому связующему ВСК-14-6 путем вычисления их свободной энергии поверхности.

Материалы и методы

Объекты исследования – углеродное волокно марки UMT42S-3K-EP, расплавленное клеевое связующее марки ВСК-14-6, полимерсотопласт марки ПСП-1-2 (96). Исследования поверхностно-энергетических характеристик проводили при помощи процессорного тензиометра. Измерения краевых углов смачивания для углеродного волокна и полимерсотопласта осуществляли в автоматическом режиме. Для исследования краевых углов смачивания углеволокна применяли метод Вашбурна, заключающийся в поднятии жидкостей для тестирования по капиллярам, образованным филаментами углеродного волокна. В качестве капилляра-прободержателя использована фторопластовая трубка с внутренним диаметром 2 мм [12]. В случае с измерением краевых углов смачивания полимерсотопласта в жидкостях для тестирования от шестиугольной сотовой ячейки отсекали одну из граней и с ее помощью проводили измерение по частному случаю для метода пластины Вильгельми. Поверхностное натяжение расплавленного связующего определяли при температуре 105 ± 2 °С методом пластины Вильгельми, представляющей собой платинированный образец металла, полностью смачиваемый связующим за счет высокой поверхностной энергии платины [13].

Свободную энергию поверхности рассчитывали на основании полученных краевых углов смачивания соответствующего материала в жидкостях для тестирования и модели Оунса–Вендта–Рабея–Кьельбле (ОВРК). Согласно этой модели, свободную

энергию поверхности можно представить в виде дисперсионной (отвечающей за слабые взаимодействия молекул твердого тела) и полярной (отвечающей за сильные взаимодействия и водородные связи) составляющих [14].

Расчеты полярности и работы адгезии связующего к твердым телам проведены с помощью рабочей среды Advance на основании полученных значений свободной энергии поверхности для исследуемых материалов.

Для активации (модификации) поверхностей твердых тел проведена их обработка плазмой атмосферного давления, которая представляет собой однородную и беспотенциальную плазму высокой плотности, полученную путем прохождения плазмообразующего газа (сжатого воздуха) через электрический разряд, генерируемый высоким напряжением. С помощью программного обеспечения станка с ЧПУ задавали следующие параметры: шаг обработки 2 мм, скорость обработки 90 мм/с, высота факела 6 мм, относительная мощность 65 %, расход плазмообразующего газа 18,5 л/мин.

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

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены результаты исследования поверхностного натяжения расплавленного клеевого связующего марки ВСК-14-6 при температуре 105 ± 2 °С методом пластины Вильгельми на процессорном тензиометре в автоматическом режиме измерения.

Таблица 1

Поверхностное натяжение расплавленного клеевого связующего марки ВСК-14-6 при температуре 105 ± 2 °С

Поверхностное натяжение, мН/м		Полярность, %
дисперсионная составляющая	полярная составляющая	
5,13±0,14	25,37±1,07	83,18
Σ30,5		

Из представленных данных видно существенное преобладание полярной составляющей поверхностного натяжения над дисперсионной, что также показывает расчетное значение полярности связующего. В соответствии с теорией смачивания слабополярных материалов, в том числе и полимеров, эффективность смачивания и адсорбции определяется соотношением дисперсионной и полярной составляющих поверхностного натяжения для жидкости. Согласно модели ОВРК, свободная энергия поверхности пропорциональна поверхностному натяжению жидкости, полностью смачивающей эту поверхность. Максимальные значения адгезии достигаются при условном равенстве свободной энергии поверхности твердого тела и поверхностного натяжения жидкости, а также имеет значение, в каком соотношении они делятся на полярную и дисперсионную составляющие. Для полимеров (особенно полимерных пленок) вклад дисперсионной и полярной составляющих зависит не только от структуры полимерных цепей, но и от морфологии поверхности, на которую оказывает влияние достаточно большое количество факторов.

С учетом вышеприведенных данных, согласно модели ОВРК, рассчитаны свободные энергии поверхности для углеволокна и полимерсотопласта и их полярные и дисперсионные составляющие. Для выполнения расчета предварительно определяли краевые углы смачивания соответствующих материалов в жидкостях для тестирования (в воде и гексане) по методу Вашбурна (для углеродного волокна) и по частному случаю пластины Вильгельми (для сотового заполнителя). В плазме атмосферного давления проведена обработка поверхностей исследуемых твердых материалов с последующим

измерением краевых углов смачивания и расчетом значений свободной энергии поверхности. Результаты измерений и расчетов представлены на рис. 1 и в табл. 2.

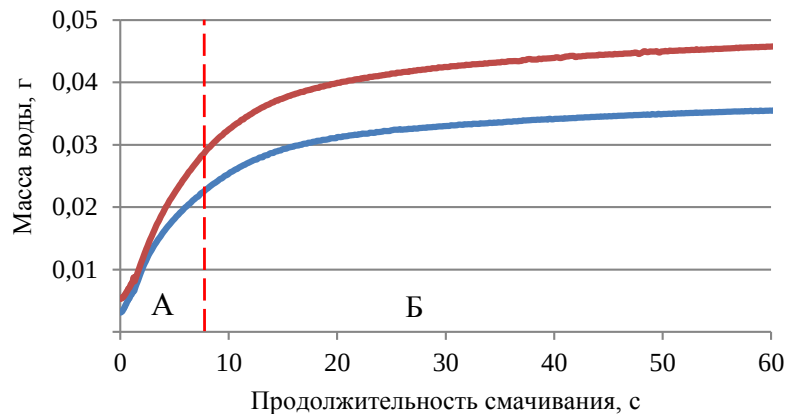


Рис. 1. Кинетические кривые смачивания углеволокна в воде до (—) и после обработки (—) плазмой атмосферного давления

Видно, что представленные кривые адсорбции характерны для измерения по методу Вашбурна. На обеих кривых наблюдаются два условных участка (А и Б), демонстрирующих стремительный прирост массы воды по времени в капилляре, что соответствует непосредственному процессу смачивания (участок А) и постепенному замедлению набора массы в пробе – выход на плато влагопоглощения для углеволокна в исследуемом капилляре (участок Б). При помощи математического аппарата, заложенного в процессорный тензиометр, вычислены значения краевых углов смачивания углеродного волокна.

Таблица 2

Поверхностно-энергетические характеристики сотового заполнителя и углеродного волокна до и после обработки плазмой атмосферного давления

Материал	Краевой угол смачивания		Свободная энергия поверхности, мН/м*	Полярность, %
	в воде	в гексане	дисперсионная/полярная составляющие	
В исходном состоянии				
Сотовый наполнитель ПСП-1-2 (96)	105±3,27	47,55±2,11	$\frac{15,67 \pm 1,24}{13,54 \pm 0,44 / 2,13 \pm 0,80}$	13,6
Углеродное волокно UMT42S-3K-EP	79,46±1,80	25,35±0,09	$\frac{28,85 \pm 2,09}{17,49 \pm 0,96 / 11,36 \pm 1,13}$	39,4
После обработки плазмой атмосферного давления				
Сотовый наполнитель ПСП-1-2 (96)	71,71±7,12	15,96±0,09	$\frac{34,10 \pm 4,60}{18,56 \pm 0,01 / 15,54 \pm 4,59}$	45,6
Углеродное волокно UMT42S-3K-EP	71,74±5,39	16,93±0,82	$\frac{34,05 \pm 3,56}{18,47 \pm 0,08 / 15,58 \pm 3,48}$	45,7
* В числителе – суммарное значение составляющих.				

Видно, что и в сотовом заполнителе, и в углеродном волокне свободная энергия поверхности проявляется в основном за счет дисперсионной составляющей. Однако после обработки поверхностей твердых тел плазмой атмосферного давления за счет тонкой очистки (и прежде всего функционализации поверхности исследуемого материала) наблюдается существенное увеличение значений свободной энергии поверхности преимущественно за счет полярной части [15]. По-видимому, это связано с тем, что на границе раздела фаз распределяются функциональные группы, способствующие

нарастанию сильных взаимодействий (донорно-акцепторных, ориентационных, индукционных и др.) системы «исследуемое твердое тело–жидкость для тестирования». Вследствие этого увеличиваются значения свободной энергии поверхности, проявлением этого является улучшенная смачиваемость твердого тела. По классификации, приведенной в работе [16], исследуемые поверхности углеродного волокна и полимерсотопласта относятся к низкоэнергетическим, причем даже после обработки плазмой атмосферного давления, при которой значения свободной энергии поверхности составляют ≤ 60 мН/м.

На основе этих вычисленных значений свободной энергии поверхности твердых тел и поверхностного натяжения связующего в рабочей среде Advance при помощи программы «анализ сцепления» проведен расчет адгезии углеродного волокна и полимерсотопласта к расплавному связующему марки ВСК-14-6. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения адгезии сотового заполнителя и углеродного волокна к клевоому связующему марки ВСК-14-6

Материал	Работа адгезии, мН/м	
	в исходном состоянии	после обработки плазмой атмосферного давления
Сотовый заполнитель ПСП-1-2 (96)	31,37	59,23
Углеродное волокно UMT42S-3K-EP	52,90	59,18

Согласно полученным результатам, расчетная адгезия связующего ВСК-14-6 к полимерсотопласту выросла в $\sim 1,9$ раза, в то время как для углеродного волокна результат оказался менее значительным. В данном случае следует отметить бесполезность плазменной обработки, поскольку расчетная адгезия связующего к исходному углеволокну и без того находится на хорошем уровне. Наглядно проиллюстрирована разница в свободной энергии поверхности и адгезии связующего к исследуемым твердым материалам на гистограмме рис. 2.

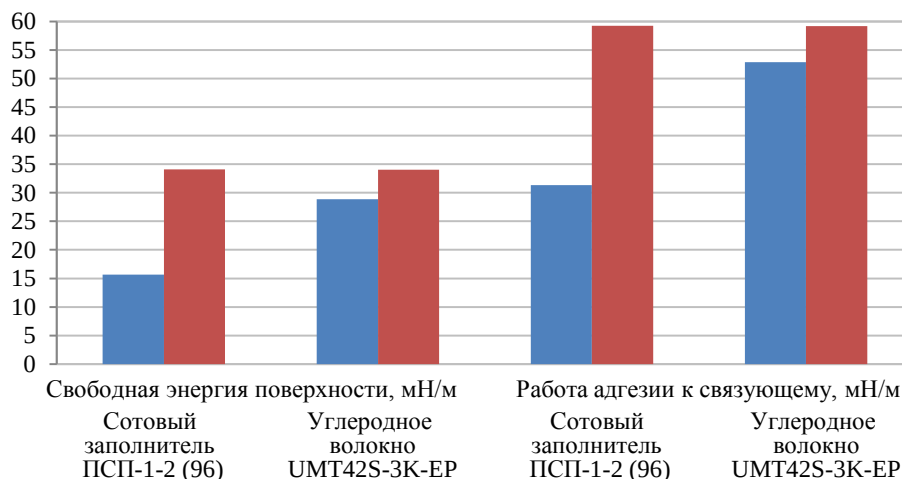


Рис. 2. Гистограмма зависимости свободной энергии поверхности и работы адгезии связующего к полимерсотопласту и углеродному волокну в исходном состоянии (■) и после обработки плазмой атмосферного давления (■)

При прогнозировании свойств ПКМ не следует напрямую соотносить значения работы адгезии жидкого связующего к твердому телу и адгезионной прочности фаз «отвержденное связующее–волокно», «отвержденное связующее–полимерсотопласт» [17]. Связано это с тем, что при отверждении связующего работа адгезии будет изменяться вследствие протекания химических реакций на поверхности раздела фаз и переориентации

макромолекул связующего к поверхности волокна с минимизацией межфазной энергии поверхности раздела. Возникновение дефектов на границе раздела за счет внутренних напряжений или изменения фазового состава и структуры поверхностного слоя также будет оказывать влияние на смачивающую способность связующего.

Дальнейшие исследования будут направлены на сравнение теоретически рассчитанной работы адгезии связующего к волокну и практических результатов оценки адгезионной прочности клеевых соединений, полученных посредством проведения механических испытаний трехслойных сотовых конструкций [18], в частности на отслаивание.

Заключения

С помощью процессорного тензиометра проведено измерение поверхностного натяжения клеевого связующего ВСК-14-6 с определением его полярной и дисперсионной составляющих, а также изучены поверхностно-энергетические характеристики углеродного волокна UMT42S-3K-EP и полимерсотопласта ПСП-1-2 (96).

Дополнительная обработка поверхностей сотового заполнителя ПСП-1-2 (96) и углеродного волокна UMT42S-3K-EP плазмой атмосферного давления значительно повышает их адгезию (в 1,9 раза) к расплавному клеевому связующему ВСК-14-6, что особенно эффективно для материала сотового заполнителя.

Исследования поверхностных явлений связующего и измерения поверхностно-энергетических характеристик твердых тел трехслойных сотовых панелей можно использовать как косвенный способ качественной оценки адгезионной прочности клеевых соединений сотовых конструкций.

Работа проводилась при Финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2023-056 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04 июля 2023 г. об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. № 4 (2). С. 198–213.
6. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
7. Тимошков П.Н., Колобков А.С., Курносков А.О., Гончаров В.А. Препреги на основе расплавных связующих и ПКМ нового поколения на их основе для изделий авиационной техники // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 7–20.

8. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
9. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. № 4. С. 2–7.
10. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
12. Салахова Р.К., Панарин А.В. Исследование поверхностных энергетических характеристик стекло- и углеволокна методом Вайсбурна // Вопросы материаловедения. 2023. № 3 (115). С. 159–169.
13. Салахова Р.К., Постнов В.И., Качура С.М., Вешкин Е.А. Особенности пробоподготовки стекловолокна для проведения измерений на тензиометре К-100 // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 126–144.
14. Зинина И.Н., Пиманов М.В. Влияние поверхностной энергии металлических образцов на прочность клеевых соединений // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 2 (12). С. 127–130.
15. Баранников А.А., Постнов В.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Применение плазмы атмосферного давления как способ подготовки поверхности полимерных композиционных материалов под склеивание // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 177–195.
16. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 68 с.
17. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
18. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.

References

1. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
2. Kablov E.N. New Generation Materials – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for the aircraft cabin. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
4. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the issue of production of floor panels from polymer composite materials for aircraft (review article). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, no. 4 (2), pp. 198–213.
6. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.

7. Timoshkov P.N., Kolobkov A.S., Kurnosov A.O., Goncharov V.A. Prepregs based on melt binders and new-generation polymer composite materials based on them for aviation equipment. *Proceedings of the V All-Rus. scientific and technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, pp. 7–20.
8. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new-generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
9. Kablov E.N. The sixth technological mode. *Nauka i zhizn*, 2010, no. 4, pp. 2–7.
10. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
11. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Shokin G.I., Kutsevich K.E., Popkova E.A. Evaluation method and factors influencing the bonding quality between face and honey-comb cores in floor and interior aircraft panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88.
12. Salakhova R.K., Panarin A.V. Study of surface energy characteristics of glass and carbon fiber by the Washburn method. *Voprosy materialovedeniya*, 2023, no. 3 (115), pp. 159–169.
13. Salakhova R.K., Postnov V.I., Kachura S.M., Veshkin E.A. Features of glass fiber sample preparation for measurements on a K-100 tensiometer. *Proc. of the V All-Rus. scientific and technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, pp. 126–144.
14. Zinina I.N., Pimanov M.V. Influence of the surface energy of metal samples on the strength of adhesive joints. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2011, no. 2 (12), pp. 127–130.
15. Barannikov A.A., Postnov V.I., Veshkin E.A., Satdinov R.A. Application of atmospheric pressure plasma as a method for preparing the surface of polymer composite materials for bonding. *Proc. of the V All-Rus. scientific and technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, pp. 177–195.
16. Bogdanova Yu. G. *Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites*. Moscow: Moscow State University, 2010, 68 p.
17. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber–matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
18. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.

Информация об авторах

Судьин Юрий Иванович, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Салахова Розалия Кабировна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Галиуллин Антон Рашидович, инженер-технолог 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Савицкий Руслан Сергеевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Yuri I. Sudin, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Rosalia K. Salakhova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton R. Galiullin, Second category engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ruslan S. Savitsky, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.11.2024.
The article was submitted 06.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.11.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-75-84

ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТКАНЕПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

К.В. Макрушин¹, А.А. Баранников¹, И.А. Ищенко¹, Ю.И. Судьин¹

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

Аннотация. Показаны основные принципы, методы и способы оценки герметичности тканепленочных материалов (ТПМ) и изготовленных из них гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха (СКВ) авиационной техники. Герметичность данных изделий является одним из основных требований и необходима для надежного функционирования СКВ. Даны методика расчета показателей герметичности при испытаниях манометрическим методом, схемы устройства для контроля герметичности ТПМ и стенда для испытаний герметичности гибких трубопроводов, а также краткий технологический процесс проведения операций контроля герметичности.

Ключевые слова: тканепленочные материалы, гибкие трубопроводы, системы кондиционирования воздуха, контроль герметичности, требования, полимеры

Для цитирования: Макрушин К.В., Баранников А.А., Ищенко И.А., Судьин Ю.И. Вопросы оценки герметичности тканепленочных материалов и изготовленных из них гибких трубопроводов систем кондиционирования воздуха // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-75-84.

Scientific article

ISSUES OF ASSESSING THE TIGHTNESS OF FABRIC-FILM MATERIALS AND FLEXIBLE PIPELINES OF AIR CONDITIONING SYSTEMS MADE OF THEM

K.V. Makrushin¹, A.A. Barannikov¹, I.A. Ishchenko¹, Yu.I. Sudyin¹

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 main principles, methods and techniques for assessing the tightness of fabric-film materials (FMM) and flexible pipelines of air conditioning systems (ACS) of aircraft made of them. The tightness of these products is one of the main requirements and is necessary for the reliable functioning of the ACS. The article presents a method for calculating the tightness indicators during tests using the manometric method, diagrams of a device for monitoring the tightness of the TPM, a stand for testing the tightness of flexible pipelines, and a brief technological process for performing tightness monitoring operations.

Keywords: fabric-film materials, flexible pipelines, air conditioning systems, control tightness, requirements, polymers

For citation: Makrushin K.V., Barannikov A.A., Ishchenko I.A., Sudyin Yu.I. Issues of assessing the tightness of fabric-film materials and flexible pipelines of air conditioning systems made of them. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-75-84.

Введение

Системы кондиционирования воздуха (СКВ) в составе конструкции современной авиационной техники предназначены для создания безопасных и комфортных условий пребывания человека на борту самолетов или вертолетов. Таким образом, главная задача СКВ – обеспечить в кабинах летательных аппаратов требуемые температурно-влажностные и воздушные режимы [1]. Как известно, климатические условия внешней окружающей среды при полетах (особенно на больших высотах) неприемлемы для существования экипажа и пассажиров. Поэтому СКВ должны создавать искусственные климатические условия для поддержания гигиенических параметров воздуха в салоне летательного аппарата [2]. Ранее основным материалом для изготовления элементов СКВ являлись алюминиевые сплавы. Но, начиная с последних десятилетий прошлого века, произошла настоящая революция в области материаловедения, а в отраслях машиностроения началось массовое внедрение полимерных композиционных материалов. Особенно такая тенденция проявилась при создании авиационно-космической техники [3–5] – например, в самолетах Ан-124 и Ан-225 объем применения композитов доходил до 28 % [6]. Применение полимерных композиционных материалов в составе СКВ очень выгодно для снижения массы и повышения ресурса летательного аппарата, а также обеспечивает экономию и необходимое качество воздуха в салоне самолетов и вертолетов. Как правило, элементы СКВ имеют вид трубопроводов разнообразных форм и размеров. В случае изготовления трубопроводов СКВ из композитов они могут быть в виде гибких конструкций круглого или овального сечения или в виде жестких коробов и труб любой геометрической формы. Использование гибких трубопроводов СКВ из композитов обусловлено следующими преимуществами:

- расположение в необходимых местах с минимальными затратами на монтаж;
- возможность размещения трубопроводов за счет гибкости в любых свободных объемах отсеков с более плотной компоновкой;
- оптимизация весовых характеристик СКВ;
- невосприимчивость к коррозии (по сравнению с трубопроводами из алюминиевых сплавов).

Как и любые детали и агрегаты авиационной техники, гибкие трубопроводы СКВ должны соответствовать требованиям по пожаробезопасности и минимуму массы, по высокой надежности и герметичности, а также по сохранению требуемых характеристик во всем диапазоне рабочих температур [7].

Характеристики гибкого трубопровода СКВ во многом зависят от свойств тканепленочного материала (ТПМ) оболочки, которая должна иметь минимальную массу, быть эластичной, прочной и термостойкой в заданном диапазоне температур – обычно от –60 до +80 °С (но возможен и другой диапазон) [8].

Тканепленочный материал представляет собой композиционный неметаллический материал, состоящий из тканевой основы, пропитанной эластичным резиноподобным полимерным составом. Возможны варианты, когда данный полимерный состав нанесен на тканевую основу в виде тонкой эластичной пленки, причем эта пленка может располагаться с одной или с обеих сторон тканевой основы.

Исходя из необходимых характеристик гибких трубопроводов СКВ в составе летательных аппаратов (таких как минимум массы, герметичность, механическая прочность, работоспособность в широком диапазоне температур, грибостойкость и стойкость к топливу и жидкости гидросистем), аналогичные требования предъявляются

к материалу оболочек гибких трубопроводов, т. е. к ТПМ, который испытывают на специально отобранных образцах [9].

Кроме того, для возможности изготовления гибких трубопроводов, к ТПМ могут предъявляться требования по адгезии к клеям и герметикам или к способности свариваться, в том числе и автоматизированной сваркой.

Материалы и методы

В настоящее время к номенклатуре авиационных ТПМ, использование которых возможно при изготовлении гибких трубопроводов СКВ, можно отнести такие серийные материалы, как Атом, Атом-2, а также опытный материал марки ВРТ-12, которые имеют удельную массу $\sim 2,9$ г/дм². Для равноценной замены импортных комплектующих возникла необходимость оснащения летательных аппаратов гибкими трубопроводами СКВ с удельной массой гибкой оболочки не более 8 г/дм². Вследствие этого ТПМ для проектируемых гибких трубопроводов СКВ (согласно расчету с учетом масс спиральной части и материала для склейки) должен иметь удельную массу не более 1,7 г/дм². Создание такого легкого материала является сложной задачей, поэтому одно из наиболее важных требований, предъявляемых к ТПМ, – сохранение герметичности в необходимом диапазоне рабочих температур [10]. Существует ряд нормативных технических документов, регламентирующих методы испытаний на герметичность различных изделий, которые применимы и к испытаниям ТПМ. Необходимо отметить следующие наиболее распространенные методы испытаний на герметичность [11]:

- *радиоактивный метод*, который предусматривает два способа реализации:
 - компрессионный, при котором изделие из испытываемого материала наполняется инертным газом, содержащим радиоактивные вещества. По индикатору радиации делают вывод о герметичности. Очевидно, что этот метод не подходит для контроля ТПМ, так как это листовый материал, не имеющий объема;
 - камерный, при котором изделие из испытываемого материала размещается в камере, содержащей газ с радиоактивным веществом. Вывод о герметичности делают аналогично – по индикатору радиации;
- *масс-спектрометрический метод* с помощью вакуумной камеры, при котором изделие из испытываемого материала размещают в вакуумированной камере и наполняют газом под давлением. Величину утечки данного газа в камеру определяют течеискателем. При этом методе также может применяться способ накопления при атмосферном давлении. В этом случае изделие из испытываемого материала размещают в камере с атмосферным воздухом и наполняют газом под давлением. Величину утечки данного газа определяют аналогично – с помощью щупа течеискателя.

Следующий способ реализации данного метода – с помощью опрессовки в камере, при котором изделие из испытываемого материала сначала вакуумируют и размещают в специальной камере, которую наполняют нейтральным газом. Затем изделие соединяют с течеискателем и определяют герметичность.

В рамках масс-спектрометрического метода существует еще способ опрессовки замкнутых оболочек, при котором изделие из испытываемого материала размещают в специальной камере, которую наполняют нейтральным газом под давлением. Затем изделие перемещают во вторую камеру – ее уже вакуумируют и определяют герметичность с помощью течеискателя, присоединенного ко второй камере.

Следующий способ контроля герметичности в рамках масс-спектрометрического метода – обдув, при котором изделие из испытываемого материала вакуумируют и обдувают инертным газом. Герметичность определяют течеискателем, соединенным с изделием.

Еще один способ, который применяется при масс-спектрометрическом методе, – определение герметичности с помощью щупа, которым исследуют поверхность изделия, заполненного инертным газом под давлением, при этом щуп подключен к течеискателю.

– *галогенный метод*, при котором существуют два способа выявления мест негерметичности:

– при помощи специального щупа, соединенного с галогенным течеискателем для исследования изделия, наполненного газом под избыточным давлением, содержащим галогены (например, фреон);

– с помощью обдува испытываемого изделия галогеносодержащим газом. Герметичность изделия определяют с помощью соединенного с ним течеискателя;

– *пузырьковый метод*, который имеет несколько способов реализации:

– при компрессионном способе надувают газом изделие из испытываемого материала и помещают его в емкость с какой-либо жидкостью (например, с водой) – при наличии негерметичности наблюдаются пузырьки газа. При способе нагревания контроль проводят аналогично, только жидкость в емкости нагревают;

– камерный способ отличается тем, что изделие из испытываемого материала подключают к специальной камере, которая позволяет считать выделяющиеся пузырьки газа. Если изделие из испытываемого материала, заполненное газом, погрузить в емкость с жидкостью и над поверхностью жидкости создать вакуум, то при наличии негерметичности также будут наблюдаться пузырьки. Такой способ называется вакуумным;

– самый простой способ – это обмыливание. При этом способе изделие из испытываемого материала также надувают индикаторным газом и покрывают пенящейся жидкостью. В случае негерметичности в слое пены образуются лопающиеся пузырьки;

– *ультразвуковой метод*, при котором изделие из испытываемого материала наполняют сжатым газом. Затем поверхность изделия обследуют ультразвуковым течеискателем – при обнаружении негерметичности изменяется сигнал прибора;

– *катарометрический метод*, при котором, в отличие от предыдущего метода, газ в изделии из испытываемого материала имеет теплопроводность, отличающуюся от теплопроводности окружающей среды. Места негерметичности изделия обнаруживают специальным катарометрическим течеискателем;

– *химический метод*, при котором поверхность изделия из испытываемого материала покрывают массой из специального химического вещества или пленкой с таким веществом. Испытываемое изделие надувают особым газом, который химически реагирует с данной массой или пленкой с появлением пятен, которые обнаруживают визуально;

– *инфракрасный метод*, при котором, аналогично предыдущим методам, изделие из испытываемого материала надувают газом, но места негерметичности обнаруживают специальным инфракрасным течеискателем;

– *параметрический метод*, при котором изделие из испытываемого материала размещают в камере с повышенным давлением газа. Заключение о негерметичности дается в случае отклонения каких-либо параметров изделия от заданных характеристик;

– *манометрический метод* может применяться различными способами:

– при компрессионном способе изделие из испытываемого материала надувают газом с повышенным давлением, затем кран закрывают и замеряют продолжительность снижения давления в изделии, по которой делают вывод о герметичности;

– при вакуумном способе в изделии из испытываемого материала создают вакуум, затем кран закрывают и замеряют продолжительность повышения давления в изделии до определенного уровня, что является основанием для заключения о герметичности изделия;

– при камерном способе изделие из испытываемого материала размещают в герметичной камере и надувают газом с повышенным давлением, затем выдерживают некоторое время. По степени возрастания давления в камере делают вывод о герметичности изделия.

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

Результаты и обсуждение

Для выбора наиболее оптимального метода контроля ТПМ необходимо определиться с критериями оценки степени герметичности данного материала в конкретной цифровой форме. Например, в ОСТ 1 00128–74 [12] приведены требования по группам герметичности с величинами соответствующих этим группам норм утечек и натеканий для изделий из испытываемых материалов, работающих под давлением сжатого газа или под вакуумом, а также рекомендации по выбору метода контроля герметичности в зависимости от номера группы. Поскольку гибкие трубопроводы авиационных СКВ относятся к системам открытого типа (т. е. на выходе соединяются с атмосферой кабины экипажа или пассажирского салона), то для их оболочек, изготовленных из ТПМ, целесообразно предъявлять требования по герметичности на уровне группы 2-12 по ОСТ 1 00128–74. Для данной группы в указанном документе рекомендуется применение манометрического метода в соответствии с ОСТ 1 41318–2002 [13], но, согласно данному стандарту, изделие из испытываемого материала должно иметь вид объемной фигуры, а ТПМ представляет собой рулонный материал. Выход из указанного противоречия возможен, если в рамках манометрического метода использовать вакуумный способ, описанный ранее. Для реализации этого способа принято, что листовой фрагмент ТПМ с площадью зоны контроля герметичности S (дм²) является разверткой на плоскость объемной фигуры в виде куба. Длина стороны куба (дм) равна a (рис. 1). Тогда объем данного куба V (л) равен $V = a^3$, площадь грани этого куба S_1 (дм²) составляет $S_1 = a^2$.

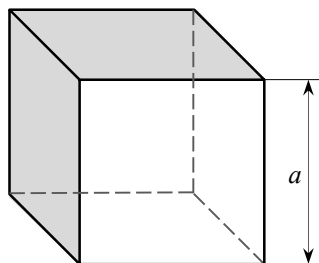


Рис. 1. Куб с площадью поверхности, соответствующей зоне контроля герметичности

Поскольку куб имеет шесть граней $S_1 = S/6$, то расчет величины утечки A (Па·л/с) проводится на основании ОСТ 1 00128–74 по формуле

$$A = \frac{P \cdot V}{t} \quad (1)$$

или, если подставить в эту формулу выражение для V , то по формуле

$$A = \frac{P(\sqrt{S/6})^3}{t}, \quad (2)$$

где P – величина снижения давления вакуума на заданную величину, Па; t – продолжительность снижения давления вакуума, с.

Величина утечки A должна соответствовать выбранной группе герметичности по ОСТ 1 00128–74. С практической стороны для контроля герметичности ТПМ данным способом возможно применение специального приспособления (рис. 2).

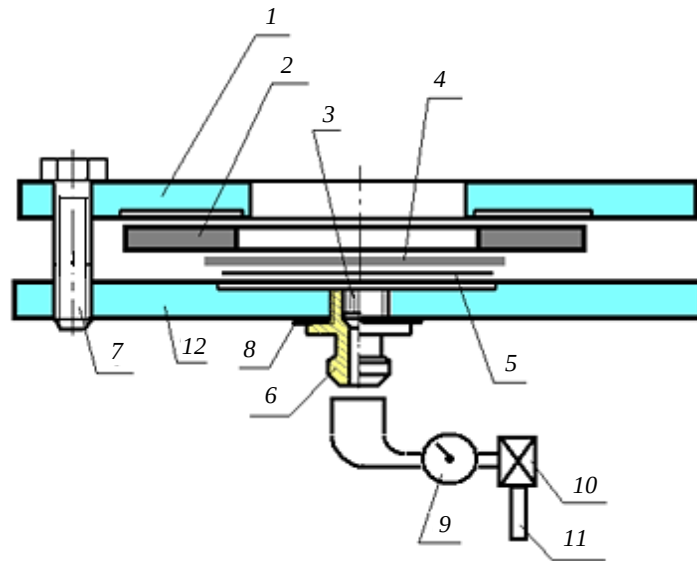


Рис. 2. Возможная схема приспособления для определения герметичности тканепленочного материала (вид сечения по плоскости, перпендикулярной плоскости образца из композита): 1 – крышка; 2 – резиновое уплотнение; 3 – втулка из пористого материала; 4 – испытуемый тканепленочный материал; 5 – слой распределительной сетки; 6 – штуцер; 7 – болт (не менее 3 шт.); 8 – прокладка резиновая; 9 – вакуумметр; 10 – кран; 11 – трубка к вакуумному насосу; 12 – основание

Видно, что приспособление имеет простую конструкцию и обеспечивает быструю процедуру контроля герметичности образца ТПМ. Верхняя поверхность основания должна быть полированной, а прилегающая к ней поверхность резинового уплотнения также должна быть максимально гладкой. Образец ТПМ вырезают в виде геометрической фигуры наиболее простой формы – например, круга или квадрата с заранее рассчитанной площадью, которая больше площади зоны контроля герметичности S на 10–15 %. В выемку основания приспособления укладывают распределительную сетку. Испытуемый образец ТПМ должен иметь несколько больший размер по сравнению с сеткой, его укладывают на сетку полимерным слоем вниз. Далее на образец помещают резиновое уплотнение, которое прижимают крышкой с помощью болтов. При испытании под образцом ТПМ создают вакуум, затем закрывают вакуумный кран, измеряют продолжительность снижения вакуумного давления на заранее заданную величину и проводят расчет величины утечки по вышеуказанной методике. Рекомендуется начинать процедуру контроля с испытания не образца ТПМ, а пленки гарантированно полностью герметичного материала – например, из металлической фольги или из тонкой резины. Таким образом, можно выявить начальную погрешность системы измерения герметичности, зависящую от наличия микроскопических зазоров между элементами приспособления. Как правило, контролируют герметичность серии образцов ТПМ, вырезанных из различных мест рулона материала каждой партии.

Поскольку главная цель оценки герметичности ТПМ – это обеспечение стабильного качества конечного изделия, т. е. гибкого трубопровода СКВ, то завершающей стадией процедуры контроля герметичности партии ТПМ должны являться изготовление гибкого трубопровода в соответствии с конструкторской и нормативно-

технической документацией [14] и контроль его герметичности. Технологический процесс изготовления данного трубопровода включает следующие операции: подготовка оснастки, раскрой оболочки из ТПМ, склейка оболочки, подготовка армирующей стренги, намотка армирующей стренги, изготовление гибких манжет для соединения с другими трубопроводами СКВ.

Выбранная технология позволяет минимизировать габариты и массу конструкции при обеспечении заданных тактико-технических характеристик и высокой надежности в сложных условиях эксплуатации [15].

На герметичность гибкого трубопровода влияет не только состояние герметичности ТПМ, применяемого при его изготовлении, но и состояние склейки оболочки и манжет. Для контроля готового гибкого трубопровода в качестве наиболее простого и эффективного решения можно предложить примененный при контроле ТПМ манометрический метод. Но использовать уже не вакуумный способ, а другой, так называемый компрессионный способ, при котором испытываемый гибкий трубопровод заполняется газом, сжатым до определенного давления. После закрытия крана измеряют продолжительность снижения давления в гибком трубопроводе на выбранную фиксированную величину. Затем проводят расчет величины утечки A по приведенной ранее формуле (1), но только с учетом того, что в качестве величины V берется внутренний объем испытываемого гибкого трубопровода, а в качестве величины снижения давления P – выбранное по условиям удобства расчета фиксированное значение, например 10000 Па (0,01 МПа или 0,1 кгс/см²) или другое, кратное ему. Величина утечки A при компрессионном способе (так же как и при вакуумном способе, примененном при испытаниях ТПМ) должна соответствовать выбранной группе герметичности по ОСТ 1 00128–74.

Для применения манометрического метода компрессионным способом разработан и изготовлен специальный стенд, показанный на рис. 3.

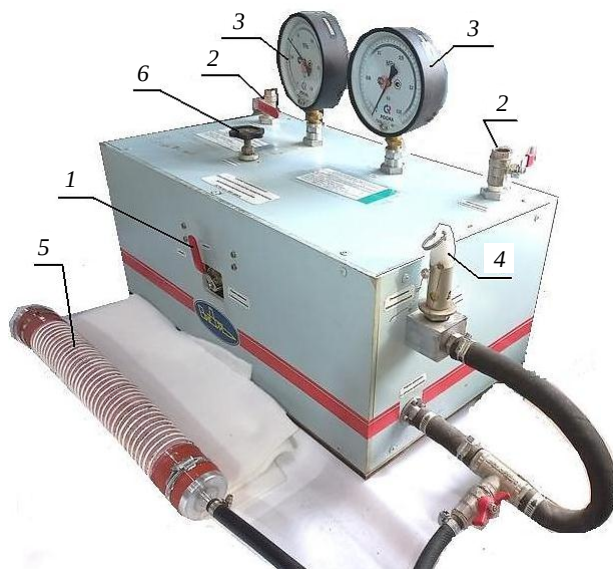


Рис. 3. Стенд для определения герметичности компрессионным способом на основе манометрического метода: 1 – кран управления; 2 – краны стравливания давления; 3 – манометры; 4 – предохранительный клапан; 5 – испытываемый гибкий трубопровод; 6 – редукционный клапан

Технологический процесс определения герметичности компрессионным способом на основе манометрического метода с помощью стенда начинают с операции

подготовки гибкого трубопровода, т. е. установки в манжетах двух заглушек, одна из которых должна иметь штуцер для закрепления шланга подачи газа с избыточным давлением. Затем после подключения стенда к сети сжатого газа с помощью редукционного клапана задают величину избыточного давления и контролируют по первому манометру. Обычно она не должна превышать 0,07 МПа. Далее с помощью крана управления подают сжатый газ под необходимым давлением внутрь испытываемого гибкого трубопровода, а по второму манометру контролируют величину давления в нем. После достижения необходимой величины давления кран управления закрывают и с помощью секундомера по второму манометру контролируют продолжительность снижения давления на ранее выбранную фиксированную величину P . По полученным данным рассчитывают величину утечки. После проведения испытаний необходимо закрыть подачу сжатого газа и снизить давление в стенде с помощью кранов стравливания. При несоответствии рассчитанной величины утечки требованиям технических условий проводят визуальный контроль мест негерметичности гибкого трубопровода (как показано ранее – компрессионным способом пузырькового метода, т. е. погружением испытываемого трубопровода в емкость с водой и подачей сжатого воздуха с помощью стенда или способом обмыливания).

Необходимо также отметить, что в целях повышения производительности труда актуальной становится задача автоматизации процедуры контроля герметичности ТПМ и изделий из него. Наиболее подробно различные методы и способы решения данной задачи рассмотрены в работе [16]. Если проанализировать факты выявленных случаев негерметичности ТПМ, то можно сделать вывод, что дефектные места имеют вид отдельных точек с отсутствующим на ткани основы полимерным покрытием. Визуально они невидимы, но на просвет с применением сильной электрической лампы эти места выглядят как яркие точки. Поэтому можно предложить косвенный метод автоматизированного контроля герметичности ТПМ, при котором полотно готового материала при его непрерывном движении на выходе из установки нанесения полимерного покрытия постоянно просвечивают сильными электрическими лампами и яркие точки мест дефектов фиксируют фотоэлектронными приборами с компьютерным управлением.

Заключения

Представленный в статье анализ методов и способов контроля герметичности ТПМ и изготовленных из них гибких трубопроводов СКВ, а также результатов натурных испытаний с применением указанного оборудования позволяет сделать вывод, что поставленные задачи успешно решаются. Данные технологии контроля герметичности опробованы, отработаны и применяются при проведении опытных и серийных хозяйственных работ по изготовлению элементов СКВ для современной авиационной техники.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2024-006 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04 июля 2023 г. об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. ГОСТ 22607–77. Системы кондиционирования воздуха самолетов и вертолетов. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1977. 7 с.
2. Ткачева В.Р., Галка Г.А. Обзор существующих систем кондиционирования воздушных судов // Молодой ученый. 2016. № 23 (127). С. 91–95.
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. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
6. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. № 2. С. 4–9.
7. 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: 23.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
8. Тканепленочный материал и изделие на его основе: пат. 2733779 Рос. Федерация; заявл. 11.11.19; опубл. 06.10.20.
9. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Иванов М.С., Павлюкович Н.Г., Донских И.Н., Морозова В.С. Влияние эксплуатационных факторов на свойства тканепленочного материала для воздухопроводов низкого давления системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-118-127.
11. ГОСТ 24054–80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1980. 14 с.
12. ОСТ 1 00128–74. Отраслевой стандарт. Герметичность изделий. Нормы. М.: МАП, 1987. 7 с.
13. ОСТ 1 41318–2002. Авиационный стандарт. Системы гидрогазовые. Контроль герметичности манометрическим методом. М.: МАП, 2002. 7 с.
14. Гибкий трубопровод из полимерного композиционного материала: пат. 2733797 Рос. Федерация; заявл. 11.11.19, опубл. 06.10.20.
15. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиационно-космической техники // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
16. Жежера Н.И. Автоматизация испытаний изделий на герметичность: учеб. пособие. Оренбург, 2005. 475 с.

References

1. State Standard 22607–77. *Air conditioning systems for aircraft and helicopters. Terms and definitions*. Moscow: Publ. House of Standards, 1977, 7 p.
2. Tkacheva V.R., Galka G.A. Review of existing aircraft air conditioning systems. *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 23 (127), pp. 91–95.
3. Kablov E.N. What to make the future from. New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

5. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
6. Kablov E.N. Materials are the basis of any business. *Delovaya slava Rossii*, 2013, no. 2, pp. 4–9.
7. 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: August 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-6-6.
8. *Film-based material and product based on it*: pat. 2733779 Rus. Federation; appl. 11.11.19; publ. 06.10.20.
9. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Ivanov M.S., Pavlukovich N.G., Donskih I.N., Morozova V.S. Influence of operational factors on the properties of fabricfilm material for lowpressure air ducts of the air conditioning system of aircraft. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-118-127.
11. State Standard 24054–80. *Mechanical engineering and instrument making products. Leak test methods. General requirements*. Moscow: Publ. House of Standards, 1980, 14 p.
12. Industry standard 1 00128–74. *Industry standard. Leakage of products*. Norms. Moscow: MAP, 1987, 7 p.
13. Industry standard 1 41318–2002. *Aviation standard. Hydrogas systems. Leakage testing by manometric method*. Moscow: MAP, 2002, 7 p.
14. *Flexible pipeline made of polymer composite material*: pat. 2733797 Rus. Federation; appl. 11.11.19, publ. 06.10.20.
15. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
16. Zhezhera N.I. *Automation of testing of products for tightness*: textbook. Orenburg, 2005, 475 p.

Информация об авторах

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

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ищенко Иван Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Судьин Юрий Иванович, инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Yuri I. Sudin, Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 07.11.2024.
The article was submitted 28.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 07.11.2024.

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95

РЕЖИМЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Е.И. Косарина¹, А.П. Гримова¹, Н.В. Осияненко¹, А.В. Смирнов¹

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

Аннотация. Рассчитаны значения линейных коэффициентов ослабления излучения металлическими порошками для аддитивных технологий и их литейными аналогами в зависимости от анодного напряжения на рентгеновской трубке. Рассмотрены сплавы на основе железа, никеля, титана, алюминия и чистые металлы, расчет коэффициентов выполнен для трех значений анодного напряжения. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что регламент ГОСТ 20426–82 может быть распространен на детали, полученные по аддитивным технологиям.

Ключевые слова: аддитивные технологии, металлические порошки, литейные сплавы, энергия излучения, линейный коэффициент ослабления излучения, контраст радиационного изображения, чувствительность контроля

Для цитирования: Косарина Е.И., Гримова А.П., Осияненко Н.В., Смирнов А.В. Режимы рентгеновского экспонирования при контроле изделий, выполненных по аддитивным технологиям // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95.

Scientific article

MODES OF X-RAY EXPOSURE FOR PARTS, MADE USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

E.I. Kosarina¹, A.P. Grimova¹, N.V. Osiyanenko¹, A.V. Smirnov¹

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

Abstract. The values of linear radiation attenuation coefficients for metal powders for additive technologies and their foundry analogues depending on the anode voltage on the X-ray tube are calculated. Alloys based on iron, nickel, titanium, aluminum and pure metals were considered, and the coefficients were calculated for three values of anode voltage. It has been theoretically established and experimentally confirmed that the GOST 20426–82 regulations can be used for parts produced by additive technologies.

Keywords: additive technologies, metal powders, casting alloys, radiation energy, linear radiation attenuation coefficient, radiation image contrast, control sensitivity

For citation: Kosarina E.I., Grimova A.P., Osiyanenko N.V., Smirnov A.V. Modes of X-ray exposure for parts, made using additive technologies. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95.

Введение

В настоящее время аддитивное производство является одним из перспективных направлений развития новых технологий [1]. Принцип аддитивных технологий заключается в послойном получении изделия на специализированном оборудовании в соответствии с предварительно преобразованной 3D-моделью [2]. Благодаря такой особенности получения детали аддитивное производство обеспечивает высокие значения коэффициента использования материала, чем выгодно отличается от так называемых «традиционных» (субтрактивных) технологий производства, подразумевающих удаление лишнего вещества из заготовки, как правило, с помощью механической обработки [3]. Один из видов 3D-печати металлами – селективное лазерное сплавление (СЛС). В настоящее время существует множество металлических порошков на основе никеля, кобальта, железа, титана, алюминия и др. [4].

Развитие перспективных технологий производства авиационной техники выявило необходимость обнаружения специфических дефектов, возникающих при новых технологических процессах, в том числе и в деталях, полученных методом СЛС [5, 6]. Как правило, изделия, полученные посредством сплавления, имеют сложную форму, а дефекты, сопровождающие этот процесс, более мелкие, чем при литье [7]. Поэтому для гарантированного обнаружения таких дефектов рентгеновскими методами неразрушающего контроля требуется строгое соблюдение расчетных режимов и параметров, чтобы такой контроль осуществлялся с высокой чувствительностью.

Расчет режимов рентгеновского контроля изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления

Аддитивные технологии

Аддитивные технологии – это методы послойного получения объектов практически любой формы с помощью компьютерных 3D-технологий. Применение аддитивных технологий в авиастроении позволяет получать изделия достаточно сложной конфигурации без дополнительных сборочных операций и механической обработки, что позволяет создавать сложные многокомпонентные композиции с использованием, например, генеративного дизайна или топологической оптимизации. При этом полностью сохраняются, а в ряде случаев и повышаются, технические и эксплуатационные свойства конечных изделий.

Аддитивные технологии характеризуются двумя признаками. Во-первых, изделия получают путем локального отверждения материала в соответствии со строго определенной траекторией – слой за слоем. Во-вторых, в основе создания изделия лежит цифровая модель. Первый признак называют признаком аддитивности, а второй – признаком виртуальности.

Классифицируют аддитивные технологии по различным принципам, например:

- по материалам (по состоянию поставки: жидкие, порошковые, прутковые; по природе материала: металлические или неметаллические и т. п.);
- по способу отверждения слоя (за счет воздействия температуры, разной длины световых волн, с помощью подачи связующего состава, спекания, сплавления и т. п.);

Однако аддитивное производство, как и любая другая технология, не может гарантировать получение бездефектных деталей, поэтому необходимо выявлять дефекты такого рода.

*Дефекты и причины их возникновения в процессе
аддитивного производства*

В табл. 1 приведен сводный перечень основных дефектов, подлежащих обнаружению методами неразрушающего контроля, составленный по результатам анализа данных об изделиях, полученных аддитивными методами, из научно-технических источников [6].

Таблица 1

**Виды дефектов и причины их возникновения,
возможное обнаружение рентгеновскими методами неразрушающего контроля**

Дефект	Причины возникновения
Пористость	Неоптимальный выбор параметров сплавления, наличие примесей в порошке и/или технологической среде, некорректная постобработка, неполное сплавление порошка [8]
Пустоты	Недостаточное количество порошка, нарушение в процессе построения из-за системы управления или неправильной калибровки, неравномерность распределения порошка
Дефекты слоя	Прекращение подачи порошка, ошибки оптических систем (лазер, электронный луч) или данных для построения. Загрязнение технологической среды (перебои подачи защитного газа, нарушение вакуума), смешивание разнородных материалов или повторное использование отработанного порошка без просеивания. Коробление детали в процессе построения [9, 10]
Несплавления	Неоптимальный выбор параметров сплавления, отклонение параметров сплавления от выбранных, изменение размеров и позиционирования лазерного пятна. Коробление детали в процессе синтеза
Трещины	Металлургические причины: градиенты температур и напряжений могут приводить к растрескиванию
Включения	Частицы инструмента (выравнивающего ножа и т. д.) попавшие в зону сплавления, частицы сплавленного порошка, оставшиеся в порошке при плохом просеивании (при повторном использовании порошка), частицы металлического порошка другого состава, оставшиеся в полостях и частях оборудования [10, 11]
Поверхностные дефекты	Неоптимальная ориентация детали в зоне построения, неоптимальные параметры синтеза, нарушения или отклонения размеров и позиционирования лазерного пятна. Коробление детали в процессе синтеза

Даже при оптимальных параметрах отработанного технологического процесса синтеза нельзя исключить вероятность образования дефектов.

*Расчет оптимальной энергии излучения
при проведении рентгеновского контроля*

В радиационных методах контроля энергия излучения (напряжение на рентгеновской трубке, которое определяет энергию генерируемых фотонов) выбирается по установленным стандартам [12]. Известно соотношение для анодного напряжения и энергии излучения: эффективная энергия ($E_{эфф}$, кэВ) численно равна 2/3 максимального напряжения на рентгеновской трубке (U_{max} , кВ). Это соотношение применимо к излучению рентгеновских аппаратов с напряжением до 1000 кВ вдали от скачков фотоэлектрического поглощения. Анодное напряжение выбирают в зависимости от толщины (имеется ввиду толщина в направлении оси пучка излучения) контролируемого объекта в соответствии с ГОСТ 20426–82. Этот документ применим к алюминиевым, титановым и другими сплавам (табл. 2).

**Область применения рентгеновских аппаратов
при проведении рентгенографического контроля**

Толщина объекта контроля, мм, в направлении оси пучка излучения из сплавов на основе			Напряжение на рентгеновской трубке, кВ (не более)
железа	титана	алюминия	
0,02	0,05	0,25	20
0,3	0,75	3,75	40
0,4	1	5	50
0,7	2	12	60
1,5	5	29	80
3	8	45	100
6	14	56	120
12	29	60	150
20	45	97	200
23	53	102	250
32	70	128	300
40	90	180	400

Аналогичный регламент существует и в международных нормативных документах. Пользуясь такими алгоритмами, анодное напряжение выбирают так, чтобы радиационное изображение, формируемое за объектом контроля (ОК), имело контраст, который обеспечивает заданную чувствительность контроля.

Излучение, выходящее из окна рентгеновской трубки, имеет дозу D_0 . При взаимодействии излучения с материалом ОК доза меняется. На эти изменения влияет толщина объекта, плотность материала, наличие в нем несплошностей. Таким образом получается радиационное изображение. Процесс получения такого изображения представлен на рис. 1.

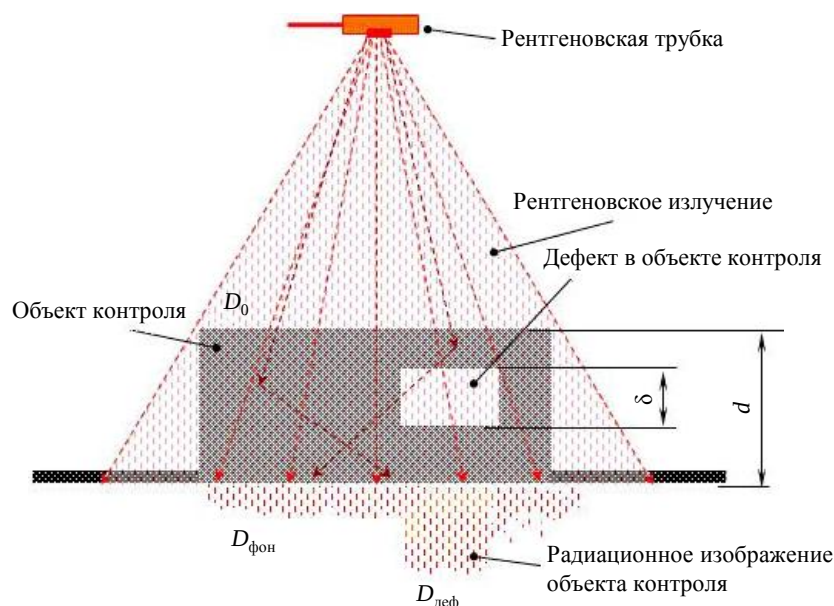


Рис. 1. Схема формирования радиационного изображения

Мерой полезной информации об ОК считают относительную разницу между фоновым и аномальным участками, т. е. контраст радиационного изображения $K_{рад}$:

$$K_{\text{рад}} = \frac{D_{\text{д}} - D_{\text{ф}}}{D_{\text{ф}}} = \frac{\mu \cdot \delta}{B} \quad [13],$$

где $D_{\text{ф}}$ – доза излучения на фоновом участке; $D_{\text{д}}$ – доза излучения на участке, соответствующем расположению дефекта; μ – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения материалом ОК; δ – размер дефекта (несплошности) в ОК в направлении оси пучка излучения; B – фактор накопления рассеянного излучения.

Согласно нормативным документам по радиационным методам неразрушающего контроля, минимальный обнаруживаемый дефект должен быть в 2 раза меньше, чем предельно допустимый дефект в ОК. Такое условие гарантирует обнаружение недопустимого дефекта. По определению, чувствительность контроля k – минимальный обнаруживаемый дефект, тогда $k = \frac{\delta}{2}$. Если размер недопустимого дефекта составляет $\delta = 0,04d$, где d – толщина контролируемого объекта в направлении оси пучка излучения, то необходимая чувствительность контроля $k = 0,02d$. При осуществлении рентгенографического контроля с такой чувствительностью на радиографическую пленку класса C5 со средним градиентом $G = 4$ минимальный оптический контраст равен

$$K_{\text{опт min}} = \frac{S_{\text{д}} - S_{\text{ф}}}{S_{\text{ф}}} = G \cdot K_{\text{рад}},$$

где $S_{\text{ф}}$ и $S_{\text{д}}$ – оптическая плотность областей рентгенограммы, соответствующих фону и дефекту, Б (бел).

Согласно критериям международных нормативных документов – $S_{\text{ф}} \geq 2 \text{ Б}$. Минимальная разница оптической плотности, фиксируемая зрительной системой оператора, составляет 0,2 Б, тогда

$$K_{\text{рад}} = \frac{K_{\text{опт min}}}{G} = \frac{S_{\text{д}} - S_{\text{ф}}}{S_{\text{ф}}} \cdot \frac{1}{G};$$

$$0,02\mu \cdot d = \frac{2,2 - 2}{2} \cdot \frac{1}{4} = 0,025; \mu \cdot d = \frac{0,025}{0,02} \geq 1,25.$$

Это условие определяет подбор анодного напряжения.

Для контроля отливок из алюминиевых и титановых сплавов, сталей и жаропрочных никелевых сплавов рассчитаны коэффициенты ослабления излучения для этих материалов. Теоретически, для изделий, выполненных по аддитивным технологиям, режимы будут аналогичными. Для доказательства этого предположения проведем расчет коэффициентов линейного ослабления излучения некоторыми металлическими порошками и сравним их с аналогами – литейными сплавами [12].

Расчет коэффициентов ослабления

Для расчета выбраны металлические порошковые композиции на основе алюминия, титана, железа и никеля и аналогичные им по химическому составу литейные сплавы, % (по массе):

Сплавы на основе Al с плотностью ~2,65 г/см ³								
Элемент	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Примеси
Порошок AlSi12 (ISO 18273:2004)	12	0,8	0,3	0,15	0,1	0,2	0,03	–
Литейный AL9-1 (ГОСТ 1583-93)	7-8	0,3	0,3	0,10	0,3	0,2	0,1	0,1Ti; 0,1Zr; 0,1B; 0,03Pb; 0,005Sn

Сплавы на основе Ti с плотностью ~4,47 г/см³

Элемент	Al	V	Si	Fe	C
Порошок Ti-6Al-4V (AMS 4911) и литейный BT6 (ГОСТ 19807-91)	6,1	4,4	0,1	0,6	0,1

Сплавы на основе Ni с плотностью ~8,5 г/см³

Элемент	Al	Ti	Cr	Co	Ta	W	Примеси		
Порошок IN939 (DIN 2.4856)	2,5	4,5	22	20	2,0	3,0	0,25		
Литейный 20X25H20C2 (ГОСТ 8559-75; 64 Ni)	6,2	1,25	5,6	8,4	2,5	3,0	5,5Re;	4,8Mo;	Nb, Hf, Ru

Сплавы на основе Fe с плотностью ~7,9 г/см³

Элемент	Si	C	S	P	Mn	Cr	Ni	Cu	Ca
Порошок 16NiCr4 (DIN 1.5714) и литейный 16XГН (ГОСТ 4543-71)	0,27	0,17	0,035	0,035	1,1	0,5	0,3	0,3	0,03

Расчет линейных коэффициентов ослабления исследуемых сплавов выполняли в соответствии с аналитическим выражением

$$\mu_{\text{спл}} = \left(\frac{\mu_1}{\rho_1} \eta_1 + \frac{\mu_2}{\rho_2} \eta_2 + \dots + \frac{\mu_n}{\rho_n} \eta_n \right) \cdot \rho_{\text{спл}},$$

где $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – линейные коэффициенты ослабления излучения первым, вторым, ..., n -м элементами, входящими в состав сплава, см⁻¹; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – плотность первого, второго, ..., n -го элементов, входящих в состав сплава, г/см³; $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – относительная массовая доля первого, второго, ..., n -го элемента, входящего в состав сплава; $\rho_{\text{спл}}$ – плотность сплава.

Поскольку линейный коэффициент ослабления излучения тем или иным элементом напрямую зависит от энергии излучения (E), для каждой металлической композиции и ее литейного аналога выбраны определенные значения энергии излучения, т. е. напряжения на рентгеновской трубке (U).

Например, толщина алюминиевых отливок находится в диапазоне от 5 до 55 мм [13, 14]. Согласно требованиям ГОСТ 20426-82, анодное напряжение для этого диапазона толщин составляет от 50 до 120 кВ, что соответствует энергии излучения – от 33,3 до 80 кэВ. Коэффициент ослабления излучения порошка на основе алюминия (AlSi12) и его литейным аналогом сплавом АЛ9-1 рассчитан для трех значений энергии излучения: 30, 50 и 80 кэВ [15].

Для порошка IN939 и жаропрочного сплава 20X25H20C2 на основе никеля, исходя из номенклатуры контролируемых изделий из них, выбраны следующие значения энергии излучения: 60, 100 и 200 кэВ (напряжение на рентгеновской трубке 90, 150 и 300 кВ соответственно). Аналогично для материалов на основе титана (Ti-6Al-4V и BT6) и железа (16NiCr4 и сталь 16XГН) выбраны значения энергии излучения: 40, 80 и 150 кэВ, что соответствует значениям анодного напряжения 60, 120 и 210 кВ.

Получены следующие значения линейных коэффициентов ослабления излучения металлическими порошками $\mu_{\text{МПК}}$ и литейными сплавами μ , см⁻¹.

Сплавы на основе Al ($\rho \approx 2,65$ г/см³)

Параметры излучения		Порошок AlSi12	Литейный АЛ9-1
E , кэВ	U , кВ		
30	50	5,761	5,440
50	75	1,38	1,513
80	120	0,602	0,698

Сплавы на основе Ti ($\rho \approx 4,47 \text{ г/см}^3$)

Параметры излучения		Порошок Ti-6Al-4V	Литейный BT6
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
40	60	9,72	9,25
80	120	2,29	1,74
140	210	1,23	0,712

Сплавы на основе Fe ($\rho \approx 7,9 \text{ г/см}^3$)

Параметры излучения		Порошок 16NiCr4	Литейный 16XГН
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
40	60	9,59	12,12
80	120	2,41	3,75
140	210	1,18	1,17

Сплавы на основе Ni ($\rho \approx 8,5 \text{ г/см}^3$)

Параметры излучения		Порошок IN939	Литейный 20X25H20C2
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
60	90	12,29	12,21
100	150	4,05	4,61
200	300	1,37	1,52

На рис. 2 показаны зависимости линейных коэффициентов ослабления излучения от напряжения на рентгеновской трубке для порошка, литейного сплава и чистого металла – основы этих сплавов.

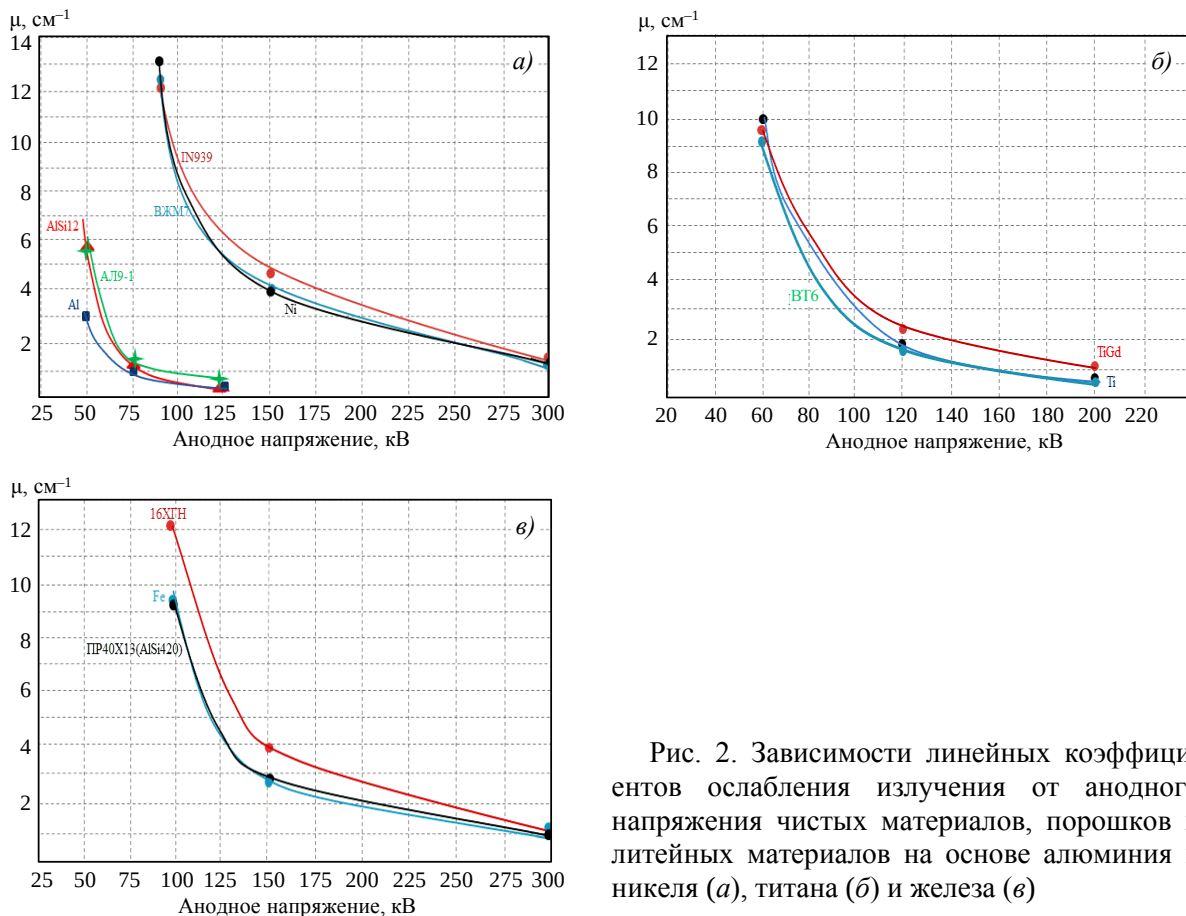


Рис. 2. Зависимости линейных коэффициентов ослабления излучения от анодного напряжения чистых материалов, порошков и литейных материалов на основе алюминия и никеля (а), титана (б) и железа (в)

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что коэффициенты ослабления порошков, их литейных аналогов и чистых металлов близки между собой настолько, что выбор режима контроля для изделий, полученных аддитивными методами, можно осуществлять, пользуясь ГОСТ 20426–82 или ГОСТ ISO 17636:1–2017 [13, 16].

Примеры расчета линейных коэффициентов ослабления излучения

Пример 1. При рентгеновском контроле объекта из сплава на основе железа толщиной 6 мм, ГОСТ 20426–82 регламентирует выбирать анодное напряжение не более 120 кВ. Согласно рис. 2, а, при анодном напряжении 120 кВ значение $\mu_{16\text{NiCr4}} = 2,41 \text{ см}^{-1}$, тогда

$$\mu_{16\text{NiCr4}} \cdot d_{16\text{NiCr4}} = 2,41 \cdot 0,6 = 1,446.$$

Поскольку $1,446 > 1,25$, то выполняется условие, при котором сформированное радиационное изображение обеспечит оптическое изображение объекта контроля с чувствительностью $0,02 \cdot d$ (2 % от просвечиваемой толщины).

Пример 2. При рентгеновском контроле объекта из сплава на основе алюминия толщиной 12 мм, ГОСТ 20426–82 регламентирует выбирать анодное напряжение не более 60 кВ. Согласно рис. 2, а, при анодном напряжении 60 кВ значение $\mu_{\text{AlSi12}} = 2,94 \text{ см}^{-1}$, тогда

$$\mu_{\text{AlSi12}} \cdot d_{\text{AlSi12}} = 2,94 \cdot 1,2 = 3,53.$$

Поскольку $3,53 > 1,25$, то выполняется условие, при котором сформированное радиационное изображение обеспечит оптическое изображение объекта контроля с чувствительностью $0,02 \cdot d$ (2 % от просвечиваемой толщины).

Пример 3. На рис. 3 представлена рентгенограмма фрагмента детали, полученной по технологии аддитивного производства, на основе железа толщиной 6 мм при просвечивании по режиму: напряжение 120 кВ, ток 7,5 мА с продолжительностью экспозиции, равной 1,5 мин.

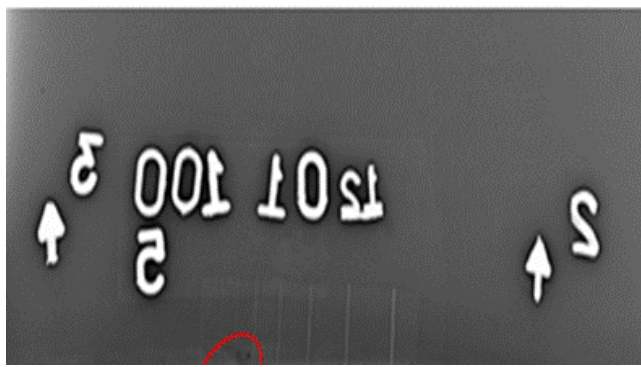


Рис. 3. Рентгенограмма фрагмента изделия толщиной 6 мм, изготовленного методом селективного лазерного сплавления из порошка на основе железа

Видно, что достигнута чувствительность контроля 0,12 мм (2 %). При этом использован режим, регламентируемый нормативными документами для отливок изделий из стали.

Заключения

На основании проведенных расчетов и экспериментов установлено, что при контроле изделий, выполненных по аддитивным технологиям, следует выбирать режимы

контроля, регламентированные нормативными документами для изделий, полученных литьем. Для порошков из железа следует пользоваться рекомендациями, представленными в нормативно-технических документах (НТД) на стали, из алюминия – на литейные алюминиевые сплавы, из титана – на литейные титановые сплавы и т. д.

Проведенные расчеты предполагают внесение поправок и дополнений в действующие НТД, на основании которых будут составлены рекомендации и регламенты по рентгеновскому контролю изделий, полученных аддитивными методами.

В ГОСТ 20426–82 приведена табл. 2: область применения рентгеновских аппаратов, которая может использоваться при разработке технологических карт контроля изделий из порошков. По требованиям ГОСТ ISO выбор анодного напряжения осуществляется посредством размещенной в нем диаграммы, которая также может быть использована при разработке технологических карт контроля.

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

Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).

Список источников

1. Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22–25.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электрометаллургия*. 2022. № 1. С. 2–12.
3. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2015. 348 с.
4. Зеленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.М. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: СПбПУ, 2013. 222 с.
5. Seifi M., Gorelik M., Waller J. et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification // *JOM*. 2017. No. 69 (3). P. 439–455.
6. Waller J.M., Parker B.H., Hodges K.L. et al. Non-Destructive Testing Methods for Products by Additive Manufacturing // *Journal of the Korean Society for Nondestructive testing*. 2016. Vol. 36. Is. 4. P. 308–314.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
8. Неруш С.В., Капланский Ю.Ю., Дынин Н.В., Бенариев И., Савичев И.Д. Разработка параметров селективного лазерного сплавления, структура и механические свойства высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Ce–C // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2023-0-1-50-68.
9. Сухов Д.И., Капланский Ю.Ю., Рогалев А.М., Куркин С.Э. Особенности получения высокохромистых сплавов на основе никеля методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2023-0-1-15-27.
10. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Чуманов И.Р. Новый износостойкий сплав на кобальтовой основе: особенности структуры металла, полученного методом ПЛВ. Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18557/2713-0193-2022-0-3-37-49.

11. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
12. Шаблов С. В., Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А. Физические основы и практика радиационного неразрушающего контроля. М.: Спектр, 2023. 168 с.
13. ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. М.: Изд-во стандартов, 1982. 23 с.
14. Демидов А.А., Степанов А.В., Турбин Е.М., Крупнина О.А. О режимах рентгеновского контроля, обеспечивающих формирование радиационных изображений с заданным контрастом // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4 (45). С. 80–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85.
15. Степанов А.В., Косарина Е.И. Требования рентгенографического неразрушающего контроля в российских и зарубежных стандартах // *Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам*. 2013. № 9. С. 2–7.
16. ГОСТ ISO 17636:1–2017. Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением пленки. М.: Стандартинформ, 2022. 36 с.

References

1. Sirotkin O.S. Current state and development prospects of additive technologies. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2015, no. 2, pp. 22–25.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
3. Shishkovsky I.V. *Fundamentals of high-resolution additive technologies*. St. Petersburg: Piter, 2015, 348 p.
4. Zelenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.M. *Additive technologies in mechanical engineering*. St. Petersburg: SPbPU, 2013, 222 p.
5. Seifi M., Gorelik M., Waller J. et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. *JOM*, 2017, no. 69 (3), pp. 439–455.
6. Waller J.M., Parker B.H., Hodges K.L. et al. Non-Destructive Testing Methods for Products by Additive Manufacturing. *Journal of the Korean Society for Nondestructive testing*, 2016, vol. 36, is. 4, pp. 308–314.
7. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
8. Nerush S.V., Kaplanskii Yu.Yu., Dynin N.V., Benarieb I., Savichev I.D. Development of laser powder bed fusion parameters, structure and mechanical properties of a high-strength aluminum alloy Al–Ce–Cu. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-50-68.
9. Sukhov D.I., Kaplansky Yu.Yu., Rogalev A.M., Kurkin S.E. The features of processing Cr-rich nickel based alloy by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2023-0-1-15-27.
10. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Chumanov I.R. New wear-resistant cobalt-base alloy: features of the structure of the metal obtained by the direct laser growth method. Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-37-49.
11. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.

12. Shablov S.V., Kosarina E.I., Mikhailova N.A., Demidov A. A. *Physical foundations and practice of radiation non-destructive testing*. Moscow: Spektr, 2023, 168 p.
13. State Standard 20426–82. *Non-destructive testing. Radiation flaw detection methods. Scope*. Moscow: Publ. House of Standards, 1982, 23 p.
14. Demidov A.A., Stepanov A.V., Turbin Ye.M., Krupnina O.A. The x-ray testing modes providing with radiation imaging with predetermined contrast. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 4 (45), pp. 80–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85.
15. Stepanov A.V., Kosarina E.I. Requirements for radiographic non-destructive testing in Russian and foreign standards. *Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam*, 2013, no. 9, pp. 2–7.
16. Gstate Standard ISO 17636:1–2017. *Non-destructive testing of welded joints. Radiographic testing. Part 1. Methods of X-ray and gamma-ray testing using film*. Moscow: Standartinform, 2022, 36 p.

Информация об авторах

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

Гримова Анна Павловна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Осияненко Наталья Викторовна, инженер 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Anna P. Grimova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nataliya V. Osiyanenko, Third Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 22.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.09.2024.
The article was submitted 22.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.09.2024.

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108

ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АМг6 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

С.А. Монин¹, П.Н. Медведев¹, К.Е. Пономарев², И.В. Стрельников²

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

²Акционерное общество «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», г. Химки, Московская обл., Россия; npol@laspace.ru

Аннотация. Приведены результаты испытаний по определению характеристик ползучести алюминиевого сплава АМг6 при статическом и циклическом нагружении при повышенных температурах. Характеристики циклической и статической ползучести необходимы для прогнозирования остаточных напряжений в сварной конструкции, подвергшейся вибрационному воздействию во время сварки. Проведен анализ кривых ползучести при статическом и циклическом нагружении. Оценено влияние малой циклической нагрузки на сопротивление ползучести с использованием уравнения Ларсона–Миллера.

Ключевые слова: ползучесть, усталость, циклическая ползучесть, сплав АМг6, параметр Ларсона–Миллера, моделирование сварки, сварка трением, сварка с наложением вибрации

Для цитирования: Монин С.А., Медведев П.Н., Пономарев К.Е., Стрельников И.В. Характеристики сплава АМг6 при статическом и циклическом нагружении // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108.

Scientific article

CHARACTERISTICS OF AMg6 ALLOY UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

S.A. Monin¹, P.N. Medvedev¹, K.E. Ponomarev², I.V. Strelnikov²

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

²Joint Stock Company «Scientific and Production Association named after S.A. Lavochkin», Khimki, Moscow region, Russia; npol@laspace.ru

Abstract. The results of tests to determine the creep characteristics of aluminum alloy AMg6 under static and cyclic loading at elevated temperatures are presented in the article. Characteristics of static and cyclic creep are necessary to predict residual stresses in a welded structure subjected to vibration during welding. Creep curves under static and cyclic loading are analyzed and compared. The effect of the variable component of the load on creep resistance is estimated using the Larson–Miller equation.

Keywords: creep, fatigue, cyclic creep, AMg6, Larson–Miller, welding modeling, friction welding, vibration during welding

For citation: Monin S.A., Medvedev P.N., Ponomarev K.E., Strelnikov I.V. Characteristics of AMg6 alloy under static and cyclic loading. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-96-108.

Введение

Для уменьшения сварочных деформаций в ответственных сварных конструкциях и дальнейшей стабилизации их геометрических размеров требуется снижение уровня остаточных напряжений в металле при их изготовлении [1, 2]. Снижение остаточных напряжений важно для сварных конструкций с малым коэффициентом запаса прочности, при наличии жестких требований к массе и ограниченных припусках на механическую обработку, при необходимости строгого соблюдения размерной точности во время эксплуатации, а также в целях экономии. На остаточные напряжения влияет термическая обработка, которую традиционно проводят для сварных конструкций [3]. Обычно термическую обработку сварной конструкции проводят в зафиксированном состоянии, когда последняя жестко закреплена в приспособлении; при этом происходят локальные пластические деформации наиболее напряженных участков в условиях снижения значений предела текучести при нагреве. Недостатками данного подхода являются высокая стоимость изготовления жестких точных кондукторов для сборки-сварки и последующей термической обработки, удлинение производственного цикла, увеличение энергоемкости, потребность в печах с достаточными размерами рабочей камеры. Помимо последующей термической обработки, существует альтернативная технология – вибрационная обработка, основанная на введении циклического механического воздействия посредством жестко закрепленного на сварной конструкции вибровозбудителя, когда сама конструкция виброизолирована. Возможно совмещение вибрационной обработки с процессом сварки – сопутствующая виброобработка, которая основана на интенсификации процессов ползучести в твердом металле при повышенных температурах, а также на особенностях механического воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл сварочной ванны. Сопутствующая виброобработка позволяет эффективно уменьшать остаточные напряжения и остаточные деформации сварных конструкций [4–6].

Релаксация остаточных напряжений, в том числе в сварных конструкциях, интенсифицируется при повышении температуры и напряжений, а также с течением времени. Релаксация вызвана сдвигодислокационными или диффузионными явлениями. В первом случае происходит групповое передвижение несовершенств («чужеродных» атомов или вакансий) по плоскостям сдвигов; во втором – индивидуальное перемещение отдельных атомов как у границ зерен основной структуры, так и между зернами. Скольжение и переползание несовершенств активизируются напряжениями определенного уровня и термическими флуктуациями колебаний атомов из равновесных положений в узлах кристаллической решетки. Релаксация остаточных напряжений связана с ползучестью. Существуют специальные методы пересчета, позволяющие преобразовывать экспериментальные кривые ползучести в расчетные кривые релаксации [7–10].

Процессы релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при комбинированном воздействии статических и циклических (вибрационных) нагрузок мало изучены и не имеют точных реологических моделей и расчетных методов определения, поэтому их исследуют экспериментально. Известно, что при наложении на квазистатическую нагрузку циклической компоненты происходит ускорение релаксационных процессов, даже если циклическая компонента нагружения много меньше статической (виброползучесть) [11–13].

Для моделирования сварочных процессов широко применяют компьютерные технологии, позволяющие проводить большой объем расчетов конечно-элементной модели, учитывающей тепловые процессы, а также возникающие сварочные деформации и напряжения. Моделирование процесса сварки с сопутствующей

вибрационной обработкой позволит прогнозировать уровень остаточных напряжений в соединениях и конструкциях. Полученное на основе количественной оценки объективное обоснование уменьшения остаточных напряжений позволит при сокращении объема трудоемких экспериментальных исследований рекомендовать сопутствующую вибрационную обработку для ответственных сварных конструкций.

Эффект ползучести материалов и его интенсификация при наложении вибраций являются основополагающими при сопутствующей вибрационной обработке. Знание характеристик ползучести при статическом и циклическом нагружении необходимо для расчетного прогнозирования уменьшения остаточных напряжений в сварной конструкции, подвергающейся циклическому вибрационному воздействию во время сварки, что хорошо согласуется с современными направлениями моделирования сварочных процессов [14–18].

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

Материалы и методы

В данной работе использованы результаты испытаний образцов из деформируемого алюминиевого сплава АМг6, характеризующегося хорошей свариваемостью. Сплав применяют во многих отраслях, в том числе в машиностроении, кораблестроении, авиационной промышленности [19].

Для определения условий испытаний на ползучесть и усталость (циклическую ползучесть) предварительно проводили испытания на растяжение на образцах из сплава АМг6 на каждом температурном уровне в диапазоне 200–500 °С через каждые 100 °С. Эти испытания проведены на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и начальной расчетной длиной 25 мм (рис. 1) на электромеханической испытательной машине в соответствии с ГОСТ 9651–84. Нагружение до ожидаемого условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) осуществляли при контроле нагрузки со скоростью 10 Н/(мм²·с), далее образцы доводили до разрушения при управлении перемещением траверсы со скоростью 1,25 мм/мин.

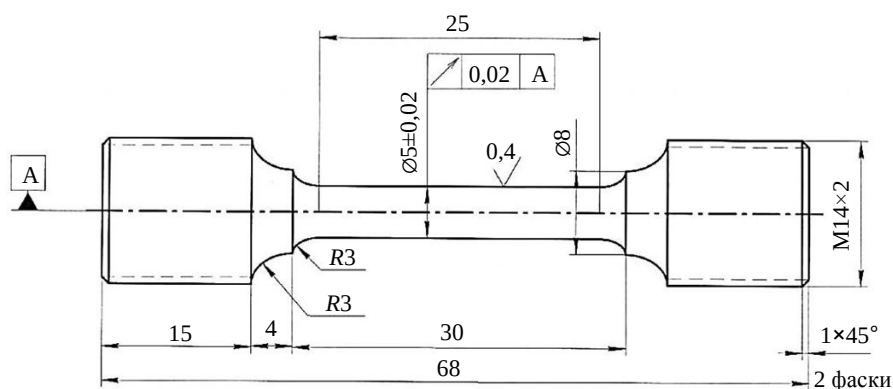


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение и ползучесть

Построение диаграмм растяжения для каждого образца осуществляли по показаниям силоизмерителя и экстензометра, установленного на рабочей части образца. В результате обработки полученных диаграмм растяжения для каждого образца определены значения модуля упругости (E), предела прочности при растяжении (σ_B), условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительных удлинения (δ_5) и сужения (ψ). Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение образцов из сплава АМг6

Температура испытания, °С	E , ГПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	ψ , %
200	69	215	185	41	74
300	60	120	115	97	89
400	54	56	35	110	91
500	10	34	19	54	82

Испытания на ползучесть (одноосное статическое нагружение) образцов из сплава АМг6 проводили на температурных уровнях 200, 300, 400 и 500 °С [20]. Напряжения выбирали ниже условного предела текучести сплава АМг6, определенные по результатам испытаний на растяжение для каждого температурного уровня. Выбранные напряжения позволили провести испытания до разрушения всех образцов.

Испытания на ползучесть проведены на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и начальной расчетной длиной 25 мм (рис. 1) на электромеханической испытательной машине в соответствии с ГОСТ 3248–81. Нагружение осуществляли при контроле позиции траверсы со скоростью 0,5 мм/мин.

По результатам испытаний для каждого образца построены первичные кривые ползучести в координатах «деформация (%) – продолжительность испытания (ч)», определены суммарная деформация ползучести (сумма упругой и остаточной деформаций) ε_c и время ее накопления $\tau_{\text{с.с.}}$.

Проведены испытания на циклическую ползучесть образцов из сплава АМгб при одноосном циклическом нагружении с синусоидальной формой цикла с частотой нагружения 50 Гц [21], на температурных уровнях 200, 300, 400 и 500 °С, на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части 5 мм и длиной рабочей части 25 мм (рис. 2), на универсальной сервогидравлической испытательной машине. Нагружение до средней нагрузки цикла происходило со скоростью 500 Н/с. Регистрацию деформации образца осуществляли при помощи высокотемпературного экстензометра с керамическими ножами.

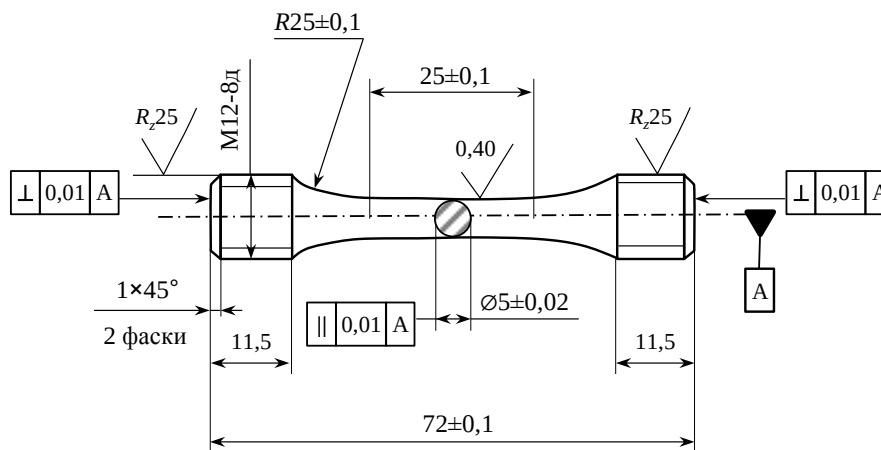


Рис. 2. Образец для испытаний на усталость

На каждом температурном уровне испытано по три образца. В качестве среднего напряжения выбраны значения условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), в качестве амплитуды – напряжение σ_a , соответствующее перемещению $\pm 0,2$ мм по траверсе. Эти значения выбраны на основании результатов испытаний на растяжение.

Все испытанные образцы доведены до разрушения. По результатам испытаний построены первичные кривые удлинения (накопленной односторонней относительной

продольной деформации) в координатах «деформация (%) – продолжительность испытания (с)», определены суммарная деформация ползучести (сумма упругой и остаточной деформаций) ε_c и время ее накопления τ_{ec} .

Результаты и обсуждение

При увеличении температуры значительно снижается прочность – предел текучести. Характеристики пластичности (относительные удлинение и сужение) достигают пика при температуре 400 °С. Диаграммы растяжения образцов из сплава АМг6 представлены на рис. 3.

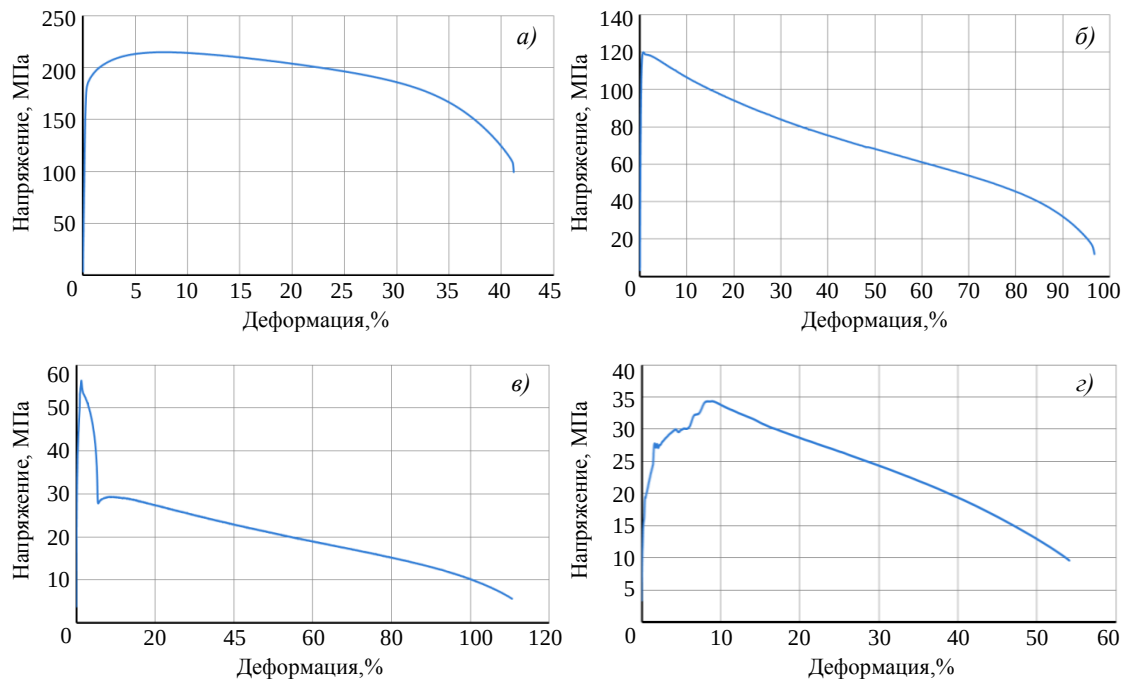


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

Первичные кривые статической ползучести образцов из сплава АМг6 представлены на рис. 4, а циклической – на рис. 5. Символом ε_0 на рис. 5 обозначена деформация, которая достигнута на момент первого достижения средней нагрузки цикла, т. е. до приложения циклической нагрузки.

Для обоих случаев следует отметить, что участок затухающей ползучести, являющейся результатом деформационного упрочнения, либо не наблюдается, либо слабо выражен. Границы между участками затухающей и установившейся ползучести выделены тонкой черной линией для тех кривых, на которых можно определить эту границу. Участки же установившейся и ускоренной ползучести выражены явно, границы между ними обозначены пунктирными линиями.

В табл. 2 представлены накопленные деформации и время до разрушения, а также приведены коэффициенты вариации, определенные по формуле:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

где x_i – i -й элемент выборки; $\bar{x}$ – среднее значение выборки, n – количество элементов выборки.

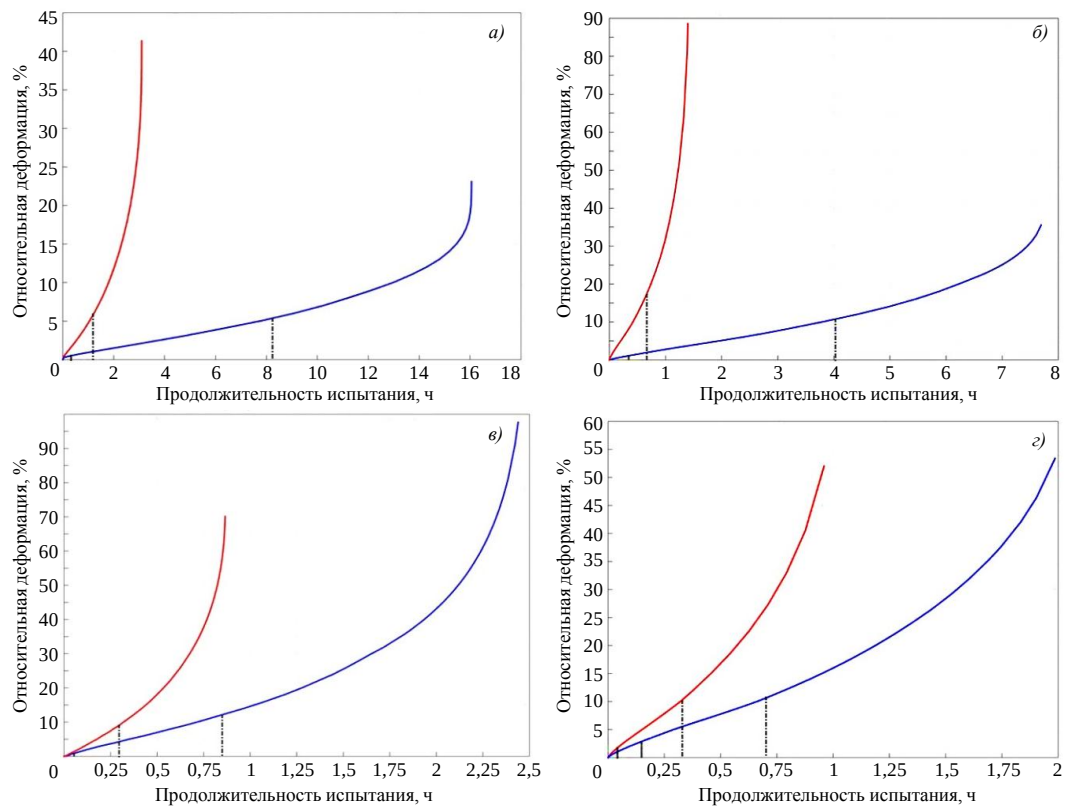


Рис. 4. Кривые статической ползучести двух образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (г)

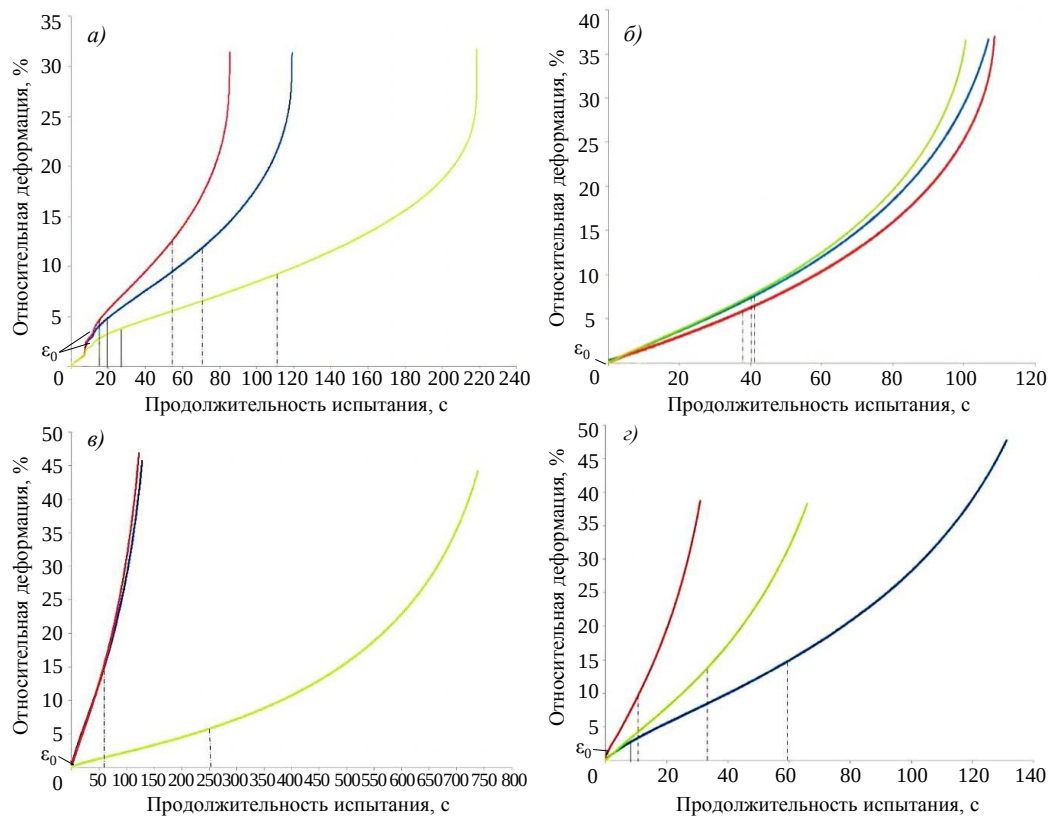


Рис. 5. Кривые удлинения трех образцов из сплава АМг6 при циклической ползучести при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (г)

Таблица 2

Результаты испытаний на циклическую и статическую ползучесть

Условный номер образца	Температура испытания, °С	σ_{cp}	σ_a	τ_{ec} , с	ε_c	$\nu(\tau_{ec})$	$\nu(\varepsilon_c)$	$(\tau_{III}/\tau_{ec})100\%$
		МПа			%			
Статическая ползучесть								
1	200	140	0	11160	41,5	68	29	60
2				57960	23			50
3	300	45	0	27720	35,5	69	42	48
4				5040	88,5			46
5	400	12	0	8784	97,5	48	16	64
6				3096	70			67
7	500	4	0	3456	52	35	1	68
8				7128	53,5			64
Циклическая ползучесть								
1	200	200	10	119	29	40	3	38
2				85	31			38
3				219	31			40
4	300	110	5	107	35	14	3	66
5				109	37			68
6				100	35			64
7	400	34	4	128	42	88	4	57
8				123	46			55
9				739	42			66
10	500	16	4	131	48	54	12	54
11				32	37			53
12				66	39			52

Для статической ползучести наблюдается значительный разброс значений времени до разрушения и накопленной деформации. Для циклической ползучести большим рассеянием значений характеризуется только время до разрушения.

В среднем деформация до разрушения увеличивается с повышением температуры с 200 до 400 °С, а затем снижается при температуре 500 °С. Аналогичная закономерность изменения характеристик пластичности δ_5 и ψ при изменении температуры, показанная в табл. 1 для статического разрушения, хорошо согласуется с данными, наблюдаемыми для циклической ползучести.

В табл. 2 также приведены данные о протяженности участков ускоренной ползучести (τ_{III}), отнесенные к полному времени до разрушения (τ_{ec}). Все полученные значения попадают в диапазон от 38 до 68 %, однозначной зависимости от температуры не наблюдается.

Для сопоставления кривых ползучести на рис. 6 представлены зависимости деформации от относительного времени до разрушения при испытаниях на циклическую и статическую ползучесть. Следует отметить следующие закономерности, характерные для всех четырех рассмотренных температур:

- как для циклической, так и для статической ползучести наблюдается стадийность – выраженные участки установившейся и ускоренной ползучести, значительно менее выраженный участок затухающей ползучести;

- для циклической ползучести характерно разрушение при меньшей накопленной деформации, чем для статической ползучести.

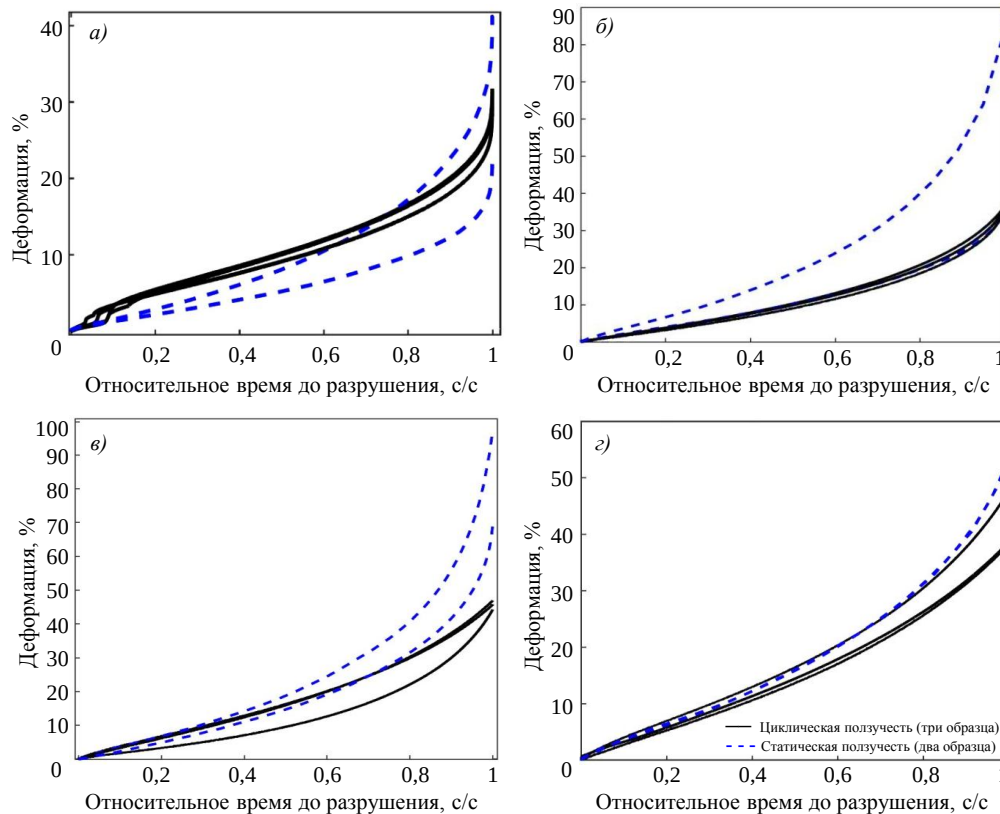


Рис. 6. Зависимость деформации от относительного времени до разрушения образцов из сплава АМг6 при температурах 200 (а), 300 (б), 400 (в) и 500 °С (з)

Часто срок эксплуатации конструкций значительно превышает доступную длительность испытаний, поэтому для прогнозирования долговечности конструкций используют результаты эквивалентных испытаний на меньших долговечностях. Высокую эффективность при этом показали методы, основанные на введении параметров, включающих температуру испытания и время до разрушения – эти параметры коррелируют с логарифмом напряжения. Введение температурно-временных параметров позволило прогнозировать ползучесть при высоких значениях долговечности с помощью проведения испытаний при температурах, превышающих температуру эксплуатации. Однако такие параметры можно использовать и в других целях – например, чтобы сопоставить результаты испытаний на ползучесть, проведенных при разных температурах.

Один из наиболее распространенных температурно-временных параметров – параметр Ларсона–Миллера [22, 23], основанный на уравнении Аррениуса:

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma)e^{\frac{-Q}{RT}}, \quad (2)$$

где $A(\sigma)$ – функция, характеризующая зависимость скорости деформирования от уровня напряжения; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; Q – энергия активации.

После интегрирования и подстановки значений времени до разрушения и деформации при разрушении уравнение принимает вид

$$\varepsilon_p = A(\sigma)\tau_p e^{\frac{-Q}{RT}}, \quad (3)$$

где τ_p – время до разрушения; ε_p – деформация разрушения.

В уравнении выделяют время температурной компенсации (*temperature-compensated time* [22])

$$\theta_p = \tau_p e^{\frac{-Q}{RT}}. \quad (4)$$

Предполагается, что θ_p постоянна для каждого материала, тогда после логарифмирования обеих частей уравнения (4), подстановки значения универсальной газовой постоянной, замены $\log_{10}\theta_p$ на константу и $0,217Q$ на параметр Ларсона–Миллера получается следующее уравнение:

$$P_{LM} = T(\log\tau_p + C), \quad (5)$$

где P_{LM} – параметр Ларсона–Миллера; T – температура, К; τ_p – время до разрушения, ч; C – константа, которую для большинства конструкционных сплавов принимают равной 20 [24].

Для большинства металлических материалов параметр Ларсона–Миллера коррелирует с логарифмом напряжения, и результаты испытаний на ползучесть аппроксимируют полиномом первой степени или более высокого порядка. В данной работе проведена аппроксимация полиномом первой степени:

$$\lg(\sigma) = a + b \cdot P_{LM}, \quad (6)$$

где a и b – константы.

Константа C принята равной 20. Для циклической и статической ползучести определены коэффициенты уравнения (3) с применением линейного регрессионного анализа:

$$\lg(\sigma_{\text{цикл}}) = 4,172 - 2,089 \cdot 10^{-4} \cdot P_{LM}, \quad (7)$$

$$\lg(\sigma_{\text{стат}}) = 4,835 - 2,731 \cdot 10^{-4} \cdot P_{LM}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{цикл}}$ – среднее напряжение в цикле при циклической ползучести; $\sigma_{\text{стат}}$ – напряжение при статической ползучести.

Экспериментальные точки и полученные зависимости в полулогарифмических координатах представлены на рис. 7. Линия циклической ползучести находится выше линии статической ползучести в области высоких напряжений (от 100 МПа и более) и ниже – при напряжениях <100 МПа, т. е. при снижении среднего уровня напряжений для указанного диапазона температур (200–500 °С) следует ожидать большее увеличение долговечности при циклической ползучести, чем при статической.

На рис. 8 приведены диаграммы распределения десятичных логарифмов времени до разрушения в координатах «температура–напряжение», построенные по уравнениям (7) и (8). По этим диаграммам можно увидеть весь диапазон температур и напряжений, соответствующий определенной долговечности. Так, рис. 8, *а* соответствует случаю, когда есть малая циклическая составляющая нагрузки, а по оси абсцисс указана превалирующая статическая составляющая; рис. 8, *б* соответствует случаю, когда нагрузка приложена только статически; на рис. 8, *в* представлены разности логарифмов времени до разрушения. Этот рисунок демонстрирует, в какой области нагрузок и температур ожидается более быстрое разрушение при статической ползучести, а в какой – при циклической.

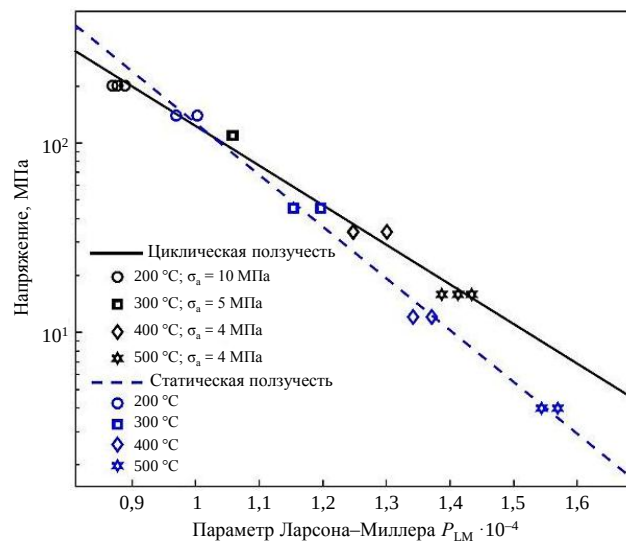


Рис. 7. Кривые Ларсона–Миллера для статической и циклической ползучести

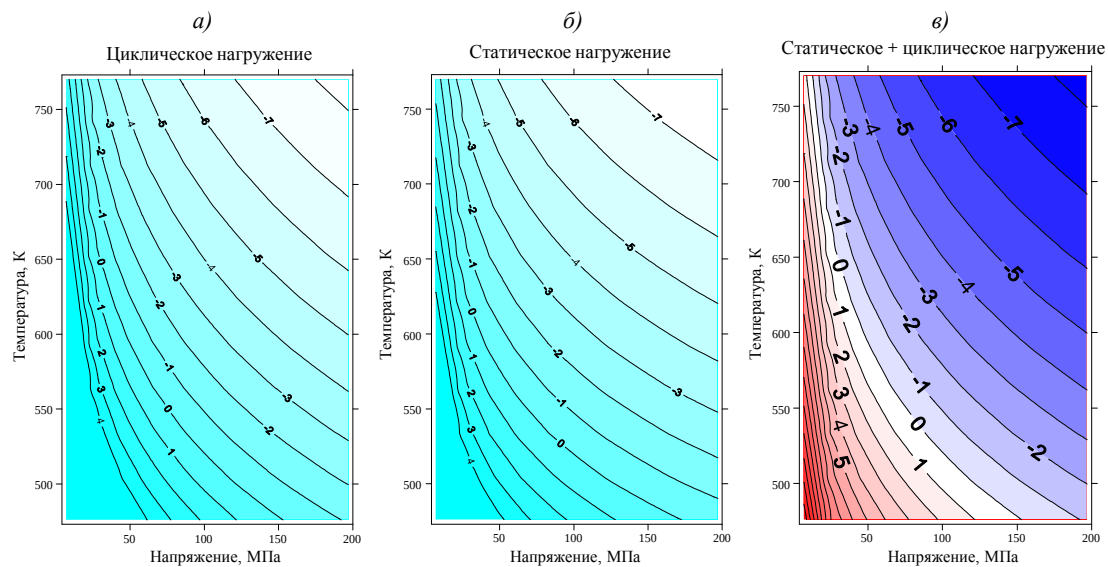


Рис. 8. Кривые равной долговечности

Полученные зависимости могут быть применены для моделирования сварочных процессов и вибрационной обработки.

Заключения

Проведены испытания образцов из сплава АМг6 на ползучесть при четырех температурах и при двух режимах испытания: на циклическую ползучесть, при которой нагрузка циклически меняется в небольшом диапазоне около среднего значения с частотой 50 Гц; на статическую ползучесть, при которой нагрузка постоянна. В результате обработки экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

– в обоих случаях при всех рассмотренных температурах наблюдается стадийность процесса на кривых ползучести – прослеживаются участки установившейся и ускоренной ползучести, продолжительность которых приблизительно одинакова. Участок затухающей ползучести либо намного менее продолжителен, либо отсутствует;

– при циклической ползучести разрушение происходит при меньших деформациях, чем при статической ползучести, кроме того, при циклической ползучести эта характеристика более стабильна;

– для аппроксимации результатов испытаний на циклическую и статическую ползучесть хорошо подходит зависимость Ларсона–Миллера. Для тех напряжений, температур и долговечностей, для которых применима эта зависимость, следует ожидать, что снижение напряжения вызовет большее увеличение долговечности при циклической ползучести, чем при статической.

Список источников

1. 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.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. № 4. С. 3–12.
3. Май Суан З., Гневко А.И., Пучков Ю.А. Исследование влияния криогенной обработки на остаточные напряжения и свойства алюминиевого сплава Д16 // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-25-31.
4. Jose M.J., Kumar S.S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // *Science and Technology of Welding & Joining*. 2016. Is. 4. P. 45–49. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
5. Ingram E., Golan O., Haj-Ali R., Noam Eliaz. The effect of localized vibration during welding of the microstructure and mechanical behavior of steel welds // *Materials*. 2019. No. 12 (2553). DOI: 10.3390/ma12162553.
6. Пономарев К.Е., Стрельников И.В. Перспективы применения различных способов вибрационной обработки ответственных сварных конструкций космических аппаратов // *Космические аппараты и технологии*. 2023. № 2. С. 126–131. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.05.
7. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов / под ред. В.Б. Киреева. М.: Металлургия, 1986. 280 с.
8. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение, 2005. 226 с.
9. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев: Наукова думка, 1978. 238 с.
10. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
11. Дубовова Е.В. Разработка методов расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах конструкций в условиях стационарной и циклической ползучести: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2012. 20 с.
12. Хохлов А.В. Анализ общих свойств кривых ползучести при циклических ступенчатых нагружениях, порождаемых линейной теорией наследственности // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Физико-математические науки*. 2017. Т. 21. № 2. С. 326–361.
13. Хохлов А.В. Свойства семейства кривых ползучести при ступенчатом нагружении линейного определяющего соотношения вязкоупругости // *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77. № 4. С. 344–359.
14. Артемьев Д.М., Буканов В.А., Садкин К.Е., Ильин А.В. Моделирование методом конечных элементов релаксации остаточных напряжений при послесварочном отпуске крупногабаритной конструкции из высокопрочной стали // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. № 1. С. 130–136.
15. Булков А.Б., Пешков В.В., Петренко В.Р., Балбеков Д.Н. Моделирование процесса высокотемпературной деформации металла при диффузной сварке в условиях ползучести // *Вестник ВГТУ*. 2011. № 8. С. 4–8.

16. Киселев А.С. Разработка методов анализа и проектирования сварочной технологии на основе компьютерного моделирования термомеханического и структурного состояния сварных конструкций: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1999. 317 с.
17. Экспериментальные методы исследований деформаций и напряжений: справ. пособие / под ред. Б.С. Касаткина. Киев: Наукова думка, 1981. 584 с.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
20. Расчеты и испытания на прочность. Метод испытаний на ползучесть при регулярном многоцикловом нагружении: Р 50-54-35-88. М.: ВНИИМАШ, 1988. 24 с.
21. 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.
22. Dowling N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 2nd ed. Upper Saddle River, 1999. 830 p.
23. Maruyama K., Abe F., Sato H. et al. On the physical basis of a Larson–Miller constant of 20 // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018. No. 159. P. 93–100.
24. Larson F.R., Miller J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses // *Transcriptions of ASME*. 1952. Vol. 7. P. 765–775.

References

1. 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.journal.viam.ru> (accessed: April 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-25-35.
2. Kablov E.N., Lukin V.I., Zhegina I.P., Ioda E.N., Loskutov V.M. Features and Prospects of Welding Aluminum-Lithium Alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, no. 4, pp. 3–12.
3. Mai Xuan D., Gnevko A.I., Puchkov Yu.A. Study of cryogenic treatment influence on residual stresses and properties of D16 aluminium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 25–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-25-31.
4. Jose M.J., Kumar S.S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds. *Science and Technology of Welding & Joining*, 2016, is. 4, pp. 45–49. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
5. Ingram E., Golan O., Haj-Ali R., Noam Eliaz. The effect of localized vibration during welding of the microstructure and mechanical behavior of steel welds. *Materials*, 2019, no. 12 (2553). DOI: 10.3390/ma12162553.
6. Ponomarev K.E., Strelnikov I.V. Prospects for the Application of Various Methods of Vibration Treatment of Critical Welded Structures of Spacecraft. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*, 2023, no. 2, pp. 126–131. DOI: 10.26732/j.st.2023.2.05.
7. Taira S., Otani R. *Theory of High-Temperature Strength of Materials*. Ed. V.B. Kireev. Moscow: Metallurgiya, 1986, 280 p.
8. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Creep and Relaxation of Residual Stresses in Hardened Structures*. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 226 p.
9. Strizhalo V.A. *Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading under low and high temperature conditions*. Kyiv: Naukova Dumka, 1978, 238 p.
10. Birger I.A. *Residual stresses*. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p.
11. Dubovova E.V. *Development of methods for calculating the relaxation of residual stresses in hardened structural elements under steady-state and cyclic creep conditions*: abstract thesis, Cand. Sc. (Tech.). Samara, 2012, 20 p.

12. Khokhlov A.V. Analysis of general properties of creep curves under cyclic step loading generated by the linear theory of heredity. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Fiziko-matematicheskiye nauki*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 326–361.
13. Khokhlov A.V. Properties of the creep curve family under step loading of the linear constitutive relation of viscoelasticity. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2015, vol. 77, no. 4, pp. 344–359.
14. Artemyev D.M., Bukanov V.A., Sadkin K.E., Ilyin A.V. Finite element modeling of residual stress relaxation during post-weld tempering of a large-sized structure made of high-strength steel. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2018, no. 1, pp. 130–136.
15. Bulkov A.B., Peshkov V.V., Petrenko V.R., Balbekov D.N. Modeling the process of high-temperature deformation of metal during diffusion welding under creep conditions. *Vestnik VGTU*, 2011, no. 8, pp. 4–8.
16. Kiselev A.S. *Development of methods for analysis and design of welding technology based on computer modeling of the thermally deformed and structural state of welded structures*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Moscow, 1999, 317 p.
17. *Experimental methods for studying deformations and stresses*: reference manual. Ed. B.S. Kasatkin. Kyiv: Naukova Dumka, 1981, 584 p.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kutyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
20. *Calculations and strength tests. Creep test method under regular multi-cycle loading*: P 50-54-35-88. Moscow: VNIIMASH, 1988, 24 p.
21. 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.
22. Dowling N.E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 2nd ed. Upper Saddle River, 1999, 830 p.
23. Maruyama K., Abe F., Sato H. et al. On the physical basis of a Larson–Miller constant of 20. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018, no. 159, pp. 93–100.
24. Larson F.R., Miller J. A time-temperature relationship for rupture and creep stresses. *Transcriptions of ASME*, 1952, vol. 7, pp. 765–775.

Информация об авторах

Монин Сергей Алексеевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Медведев Павел Николаевич, начальник сектора, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пономарев Константин Ефимович, главный сварщик, АО «НПО Лавочкина», npol@laspase.ru

Стрельников Илья Владимирович, ведущий инженер-технолог, к.т.н., АО «НПО Лавочкина», npol@laspase.ru

Information about the authors

Sergey A. Monin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Pavel N. Medvedev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin E. Ponomarev, Chief Welder, JSC «SPA Lavochkin», npol@laspase.ru

Ilya V. Strelnikov, Leading Engineer-Technologist, Candidate of Sciences (Tech.), JSC «SPA Lavochkin», npol@laspase.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; получена после доработки 22.11.2024;
одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.11.2024.
The article was submitted 21.10.2024; received in revised form 22.11.2024;
approved and accepted for publication after reviewing 22.11.2024.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



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

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

25 высокотехнологичных
наукоемких производств по выпуску
253 наименований материалов
и полуфабрикатов

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

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



национальная
система
аккредитации
инфраструктура
доверия



SAFRAN
Snecma



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



Разработка технологий и производство
полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

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



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

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



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

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

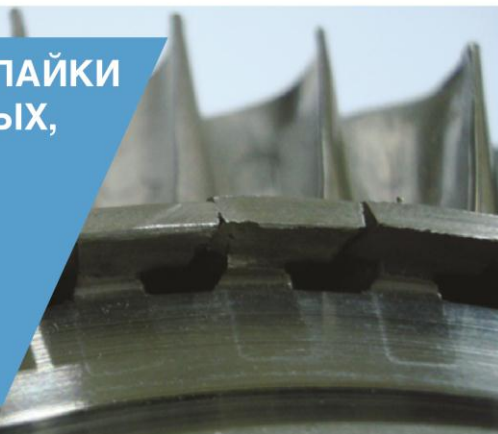
на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru



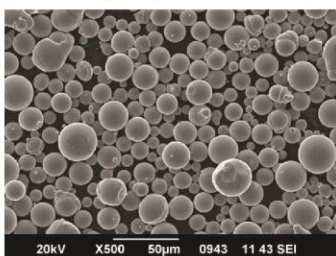
ПАЙКА КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПАЙКИ

**РАЗРАБОТКА ПРИПОЕВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ, ТИТАНОВЫХ,
МЕДНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ
В ОДНОИМЕННОМ И РАЗНОИМЕННОМ
СОЧЕТАНИЯХ, ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ
РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И СЛОЖНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ.**

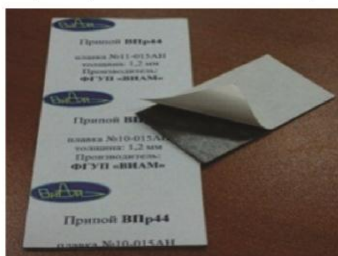


ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ ГТД: НИКЕЛЕВЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ И ТИТАНОВЫЕ ПРИПОИ:

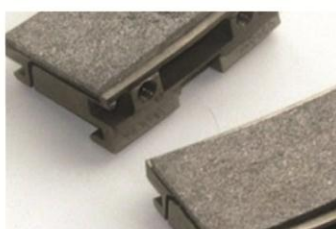
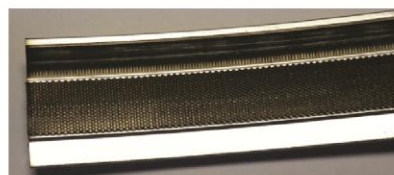
- прочность паяных соединений на уровне 0,7–0,95 от прочности соединяемых материалов;
- совмещение режима пайки с режимом термообработки основного материала.



- сферическая форма гранул;
- низкое содержание кислорода (менее 0,010%).



- Припой 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.

МЫ СЕРИЙНО ПРОИЗВОДИМ И ПОСТАВЛЯЕМ ПРИПОИ МАРОК:

- титановые – ВПр16, ВПр28;
- никелевые – ВПр7, ВПр11, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр42, ВПр44, ВПр50;
- низкотемпературные – ВПр35, ВПр40;
- медно-никелевые – ВПр1, ВПр4.



СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕМОНТ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СВАРКИ

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

5 000 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;
- разработку технологий ремонта деталей методом сварки;
- трансфер технологий для различных отраслей промышленности.

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru



СОПЛА ДЛЯ РАСПЫЛЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ И КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭМИТТЕРЫ

ВЫПУСКАЮТСЯ КЕРАМИЧЕСКИЕ СОПЛА
ШИРОКОГО РЯДА ТИПОРАЗМЕРОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ
РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ,
И КЕРАМИЧЕСКИЕ ЭМИТТЕРЫ ДЛЯ
ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ



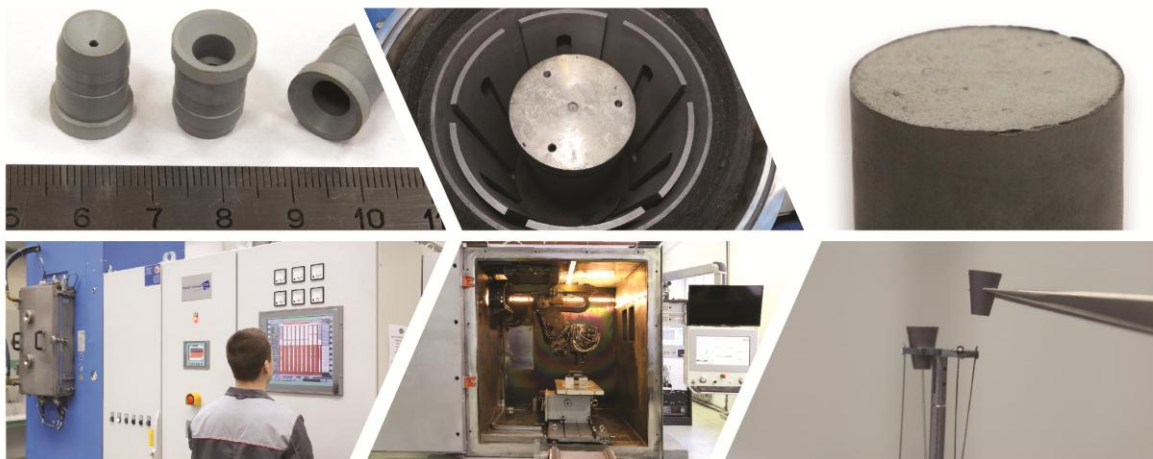
Производственные
мощности

130 кг

керамического композиционного
материала в год

5000 шт. сопел в год

1 500 – 2 000 шт. катодов в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку составов и технологий изготовления керамических материалов конструкционного и функционального назначения;
- керамический композиционный материал ВМК-17;
- сопла из ВМК-17 диаметром от 12 до 36 мм и высотой от 16 до 90 мм;
- керамические эмиттеры 4,7 мм и толщиной 1,5 мм;
- керамические эмиттеры диаметром 6,0 мм и толщиной 1,5 мм;
- керамические эмиттеры сложной формы по чертежам заказчика.

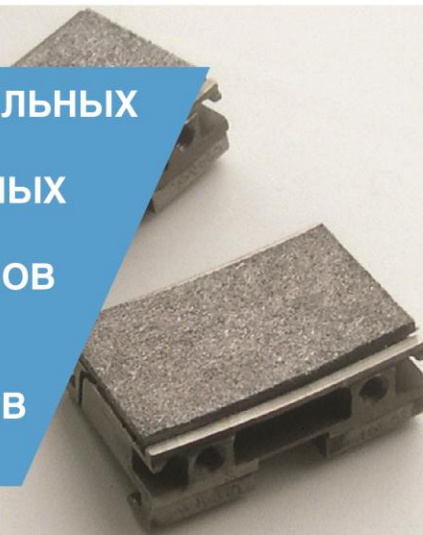
Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

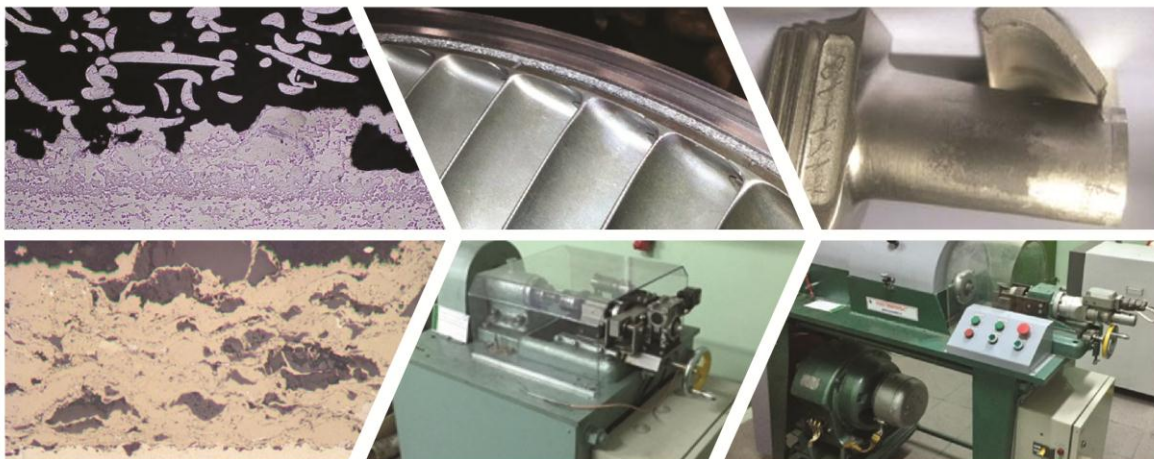
E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru

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.



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

ОДНО ИЗ ВЕДУЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЛЬЯНОВСКОЙ
ОБЛАСТИ ПО РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ.

ПРОИЗВОДИТ ПОЛУФАБРИКАТЫ И ИЗДЕЛИЯ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ.



Производственные
мощности:

40 т растворных
связующих
в год

25 т расплавных
связующих
в год

100 м² формообразующих
оснасток

50 000 пог.м

препегов на
основе растворных
связующих

30 000 шт

листов
стекло- и
оргопластиков

500 000 пог.м

клеевых препегов
марки КМКС

350 000 пог.м

препреги нового
поколения

1 200 шт

заготовок
панелей пола

20 т

заготовок
изделий из ПКМ

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



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; untc.viam.ru





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

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

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

Производственные мощности:

29 т бериллийсодержащие стали и сплавы в год

209 единиц технологического и исследовательского оборудования

10 т препрегов ПКМ в год

7700 м²

площадь производственных помещений

13 производственных участков



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; vetc.viam.ru





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

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



Основные
показатели:

2118 м²

площадь лабораторно-
исследовательского
корпуса

>100

единиц испытательного
и исследовательского
оборудования

1100 м²

площадь атмосферного
испытательного полигона

200 м²

площадь
силового пола

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

Атмосферный испытательный полигон:

Открытая площадка –
до 10000
образцов одновременно



Площадка под навесом –
до 1000
образцов одновременно



Силовой пол с нагрузкой
до 500 мПа



Площадка для испытаний
узлов и конструкций –
288 м²



Испытания при совместном воздействии
климатических факторов,
статических и циклических нагрузок

Метеостанция,
работающая в непрерывном
автоматическом режиме



Лабораторные исследования:



Физико-механические
испытания



Исследования методами
неразрушающего контроля



Металлофизические
исследования



Химико-аналитические
исследования



Исследования теплофизических
свойств



Электрохимия
и исследования покрытий



Испытания при повышенной
температуре и влаге



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



Испытания в коррозионно-
активных средах



Испытания и исследования
систем защиты

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

E-mail: admin@viam.ru
www.viam.ru; gcki.viam.ru



ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

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

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

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

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

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

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

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

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

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

9. Основные технические параметры рукописи:

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

10. Форма подачи рукописи:

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

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

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

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

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

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

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

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

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

ТРУДЫ ВИАМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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