

№6
(148)
2025

ISSN 2307-6046



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



ТРУДЫ ВИАМ



ТРУДЫ ВИАМ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2013 ГОДА

№ 6 (148) июнь 2025

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

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

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

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

Члены совета:

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

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

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

Адрес редакции:

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

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

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

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

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

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

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Жаропрочные сплавы и сталиHeat-resistant alloys and steels

Севальнев Г.С., Климов В.С., Власов И.И., Мазалова Т.А. Исследование механических свойств синтезированных образцов из стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo после различных видов обработки 3

Sevalnev G.S., Klimov V.S., Vlasov I.I., Mazalova T.A. Study of mechanical properties of Fe–Cr–Ni–Co–Mo steel 3D-printed samples after various types of processing

Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Епишин А.И., Елютин Е.С. Развитие метода направленной кристаллизации для решения задач физического металловедения никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов. Часть 2 13

Petrushin N.V., Svetlov I.L., Epishin A.I., Elyutin E.S. Development of directional solidification method to solve the problems of physical metallurgy of nickel- and cobalt-based superalloys. Part 2

Свиридов А.В., Фомичева О.В., Голев Е.В., Козырева О.Е. Аддитивное производство методом электродуговой наплавки проволоки 31

Sviridov A.V., Fomicheva O.V., Golev E.V., Kozyreva O.E. Wire arc additive manufacturing method

Композиционные материалыComposite materials

Иваньков Р.Р., Клименко О.Н., Гуляев И.Н., Осияненко Н.В. Влияние различных методов резки на структуру и упруго-прочностные свойства образцов углепластика 46

Ivankov R.R., Klimenko O.N., Gulyaev I.N., Osiyanenko N.V. The influence of different cutting methods on the texture and stress-related properties of carbon fiber samples

Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Шаркалов А.А. Исследование эксплуатационных свойств теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 64

Salimov I.E., Bepalov A.S., Babashov V.G., Sharkalov A.A. Thermal and sound insulation material of the VTI-29 brand: study of operational properties

Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Барботько С.Л., Баранников А.А. Исследование горючести, дымообразования и токсичности в процессе горения полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых конструкций на их основе 73

Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Barbotko S.L., Barannikov A.A. Study of flammability, smoke formation and toxicity in the process of combustion of polymer composite materials and three-layer honeycomb structures based on them

**Защитные и функциональные
покрытия**

Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 2. Влияние различных климатических зон 86

**Protective and functional
coatings**

Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 2. Influence of different climatic zones

Испытания материалов

Пичугин С.С., Яковлева С.И., Кулаков В.В., Измайлов М.А., Королеев А.П. Выбор параметров вихретокового контроля при оценке глубины дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах 98

Material tests

Pichugin S.S., Yakovleva S.I., Kulakov V.V., Izmailov M.A., Korolev A.P. Selection of eddy current testing parameters during the estimation of defects' depth in carbon-carbon composite materials

Барботько С.Л. О горении титановых сплавов и методах оценки их пожарной опасности 110

Barbotko S.L. About combustion of titanium alloys and methods of assessment of their fire hazard

Научная статья

УДК 669.017.15

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe–Cr–Ni–Co–Mo ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОБРАБОТКИ

Г.С. Севальнев¹, В.С. Климов¹, И.И. Власов¹, Т.А. Мазалова¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований механических свойств образцов из высокопрочной коррозионностойкой мартенситостареющей стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, полученных методом селективного лазерного сплавления. Проведен сравнительный анализ механических свойств при температуре окружающей среды (20 °C) и при повышенных температурах (500 и 550 °C) образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, а также механически обработанных образцов и образцов без механической обработки рабочей поверхности.

Ключевые слова: мартенситостареющая сталь, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, механическая обработка поверхности, направление синтеза, механические свойства

Для цитирования: Севальнев Г.С., Климов В.С., Власов И.И., Мазалова Т.А. Исследование механических свойств синтезированных образцов из стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo после различных видов обработки // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.

Scientific article

STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF Fe–Cr–Ni–Co–Mo STEEL 3D-PRINTED SAMPLES AFTER VARIOUS TYPES OF PROCESSING

G.S. Sevalnev¹, V.S. Klimov¹, I.I. Vlasov¹, T.A. Mazalova¹

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 paper presents the results of mechanical properties studies of samples made from high-strength corrosion-resistant maraging steel of the Fe–Cr–Ni–Co–Mo system, obtained by selective laser melting. A comparative analysis of mechanical properties at ambient temperature (20 °C) and at elevated temperatures (500 and 550 °C) of 3D-printed samples along the Z axis and along the XY plane, as well as mechanically processed samples and samples without mechanical processing of the working surface was carried out.

Keywords: maraging steel, additive technologies, selective laser melting, mechanical surface treatment, direction of 3D-printing, mechanical properties

For citation: Sevalnev G.S., Klimov V.S., Vlasov I.I., Mazalova T.A. Study of mechanical properties of Fe–Cr–Ni–Co–Mo steel 3D-printed samples after various types of processing. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-3-12.

Введение

В настоящее время теплонагруженные детали силовых установок, работающие при температурах до 600 °С в условиях воздействия избыточного давления и агрессивных сред, изготавливают из жаропрочных дисперсионно-твердеющих мартенситных, мартенситоферритных и мартенситостареющих сталей, в том числе марок 08X14H5M2ДЛ, 15X12ВНМФ и 31X19H9МВБТ [1–7].

В большинстве случаев для работоспособности узлов силовых установок используют детали различной нестандартной геометрической формы с небольшой толщиной стенок. Производство тонкостенных сложнопрофильных деталей по традиционным технологиям зачастую невозможно либо чрезвычайно дорого по причине многостадийности – большой длительности и сложности процесса, включающего литье заготовок, многоступенчатую термическую обработку для достижения требуемого уровня механических свойств материала и токарно-фрезерную обработку заготовки до заданных геометрических размеров конечного изделия. При этом неизбежным остается высокий процент выбраковки, вызванный дефектами литья и деформациями тонкостенных изделий при токарно-фрезерной обработке, что дополнительно снижает экономические показатели производства. Все это обуславливает необходимость перехода к передовым цифровым производственным процессам изготовления подобных деталей, в связи с чем наиболее актуальным направлением получения заготовок для данных деталей является синтезирование материала из металлопорошковых композиций.

В свою очередь, применение аддитивных технологий обеспечивает экономическую эффективность производства деталей из различных марок сталей в связи с сокращением операций технологического процесса, повышением коэффициента использования металла, а также получением высокого уровня механических характеристик конечного изделия [8–10].

Для обеспечения работоспособности узлов силовых установок предложена высокопрочная мартенситостареющая коррозионностойкая сталь системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, обладающая высоким уровнем механических характеристик как при 20 °С, так и при повышенных температурах до 500 °С. Упрочнение стали происходит по механизму твердорастворного упрочнения вследствие образования мартенсита при закалке и последующего дисперсионного твердения за счет избыточных и интерметаллидных фаз [11, 12].

В интервале температур >500 °С для сталей таких систем легирования реализуются механизмы разупрочнения путем образования аустенита и коагуляции упрочняющих частиц. Конечное упрочнение высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo происходит за счет старения в температурном интервале 400–600 °С. В связи с этим исследование процессов изменения структуры и механических свойств при температуре >500 °С является одной из актуальных задач.

Технологические параметры процесса синтезирования материала, такие как направление выращивания, градиент распределения температур подложки и поверхностного слоя при выращивании, плотность энергии при синтезировании и стратегия сканирования, оказывают значительное влияние на формирование конечной структуры и уровня механических свойств деталей [13, 14].

В работах [15, 16] рассмотрено влияние заключительной механической обработки на некоторые характеристики материала, однако на коррозионностойких мартенситостареющих сталях особенности влияния на конечный уровень свойств не рассматривались.

Исходя из вышеперечисленных факторов, целью данной работы являлась оценка влияния ориентации детали на плите построения и механической обработки рабочей поверхности образцов на механические свойства синтезированной по технологии селективного лазерного сплавления высокопрочной мартенситостареющей

коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, а также исследование микроструктуры и механических характеристик при повышенных температурах.

Материалы и методы

Изготовление металлопорошковой композиции мартенситостареющей коррозионностойкой стали проводили на промышленном тигельном атомизере с максимальной температурой нагрева 1700 °С и давлением до $6,67 \cdot 10^{-1}$ Па. В качестве исходного материала использовали литые прутковые заготовки, изготовленные в вакуумной индукционной печи.

Контроль химического состава литых прутковых заготовок проводили методами атомно-эмиссионной спектроскопии (определение Ni, Cr, Co, Mo, Mn, Nb, Si), восстановительного плавления для определения O и N и сжигания образца в токе кислорода для определения S в соответствии с ГОСТ 12344–2003, ГОСТ 12345–2001, ГОСТ 17745–90 и ГОСТ Р 55079–2012.

Изготовленные литые прутковые заготовки использовали для получения металлопорошковой композиции из высокопрочной коррозионностойкой стали фракции 10–63 мкм. Схема изготовления металлопорошковой композиции целевой фракции включает подготовку литых шихтовых заготовок и их загрузку в тигель, плавку и распыление расплава инертным газом, выгрузку порошка, рассев на фракции и аэродинамическую сепарацию, контроль качества.

Гранулометрический состав изготовленных партий металлопорошковых композиций определяли на лазерном анализаторе частиц по ГОСТ 8.777–2011 методом дифракции лазерного излучения в жидкости.

Синтез образцов из высокопрочной коррозионностойкой стали проводили в среде азота на аддитивной установке, оснащенной двумя YLR-волоконными лазерами мощностью по 400 Вт каждый.

Термодинамические расчеты для оценки фазового состава проводили в программном обеспечении на базе метода Calculation Phase Diagrams (CalPhaD). В качестве входных данных использовали химический состав, а также базу данных по термодинамическому анализу сплавов на основе железа.

Определение шероховатости поверхности образцов проводили с применением профилометра.

Для оценки влияния механической обработки рабочей поверхности образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, на механические свойства высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo проводили испытания на статическое растяжение при температурах 20, 500 и 550 °С на сервогидравлической разрывной машине в соответствии с ГОСТ 1497–2023 и ГОСТ 9651–84. Скорость перемещения траверсы при испытании составила 5 мм/мин. Объемную долю мартенсита после испытаний оценивали по количеству магнитной фазы, определяемой методом Штеблея по намагниченности насыщения $4\pi J_s$ в установке баллистического типа. Расчет объемного содержания мартенсита проводили по методике, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Испытания на длительную прочность цилиндрических образцов проводили при напряжении 480 МПа и температуре 550 ± 5 °С на базе 100 ч, испытания на ползучесть с базой 100 ч – при температуре 500 ± 5 °С и напряжении 140 МПа с допуском на деформацию 0,2 %. Ударную вязкость определяли на образцах с U-образным концентратором напряжений в соответствии с ГОСТ 9454–78.

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

Результаты и обсуждение

После распыления литой прутковой заготовки проведен анализ гранулометрического состава для контроля возможности применения металлопорошковой композиции в аддитивном производстве. На рис. 1 представлено распределение частиц по размерам полученной металлопорошковой композиции высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, из данных которого видно, что при содержании целевой фракции на уровне ~90 % и нормальном распределении фракции в интервале 10–63 мкм параметр D_{50} составляет 31,5 мкм (см. таблицу).

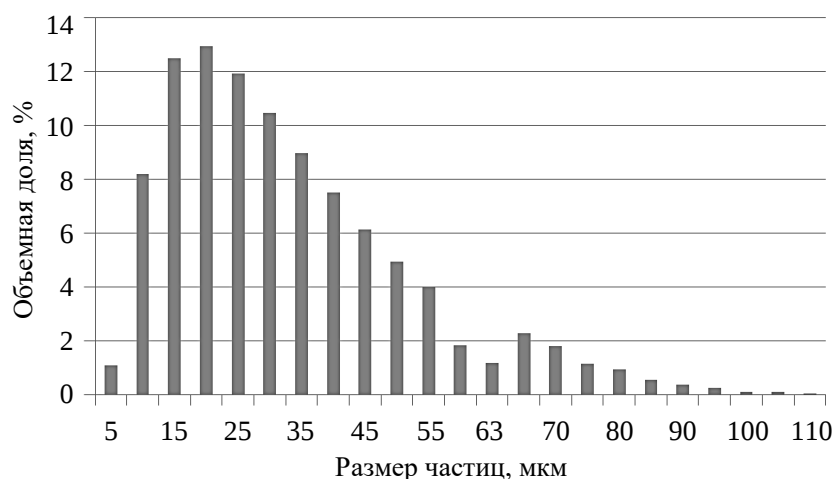


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц металлопорошковой композиции из стали по размерам

Гранулометрический состав металлопорошковой композиции из стали фракции 10–63 мкм

Средний размер частиц, мкм	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀	Содержание частиц, %, размером, мкм		
	мкм			<10	10–63	>63
37,9	15,3	31,5	62	1,1	91,79	7,11

Термодинамический анализ химического состава на базе метода CalPhaD, проведенный в интервале температур 400–1200 °С, позволил оценить распределение фазовых составляющих в структуре стали в процессе термической обработки (рис. 2). Высокопрочная коррозионностойкая сталь системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo относится к мартенситостареющему классу и после закалки обладает преимущественно мартенситной структурой. Последующее старение при температурах >400 °С приводит к образованию σ -фазы (Fe–Cr–Mo), которая оказывает положительное влияние на прочностные характеристики, но при этом отрицательно влияет на относительное удлинение и ударную вязкость. Помимо этого, в структуре образуются интерметаллидные μ -фаза (Fe₇Mo₆) и Ni₃Nb (за счет микролегирования ниобием), мелкодисперсные карбиды хрома Cr₂₃C₆, которые также оказывают положительное влияние на уровень механических свойств.

В соответствии с проведенными термодинамическими расчетами, анализом научно-технической литературы [17] и опытом НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области разработки мартенситостареющих сталей [6, 11] выбрана термическая обработка для высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo, состоящая из закалки из области температур с достаточным растворением избыточных и интерметаллидных фаз и последующего старения с реализацией определенного соотношения карбидной, σ - и μ -фаз. Такая термическая обработка обеспечивает достаточно

высокий уровень механических свойств стали. После полного цикла термической обработки микроструктура образцов состояла из мартенсита, остаточного аустенита и интерметаллидов.

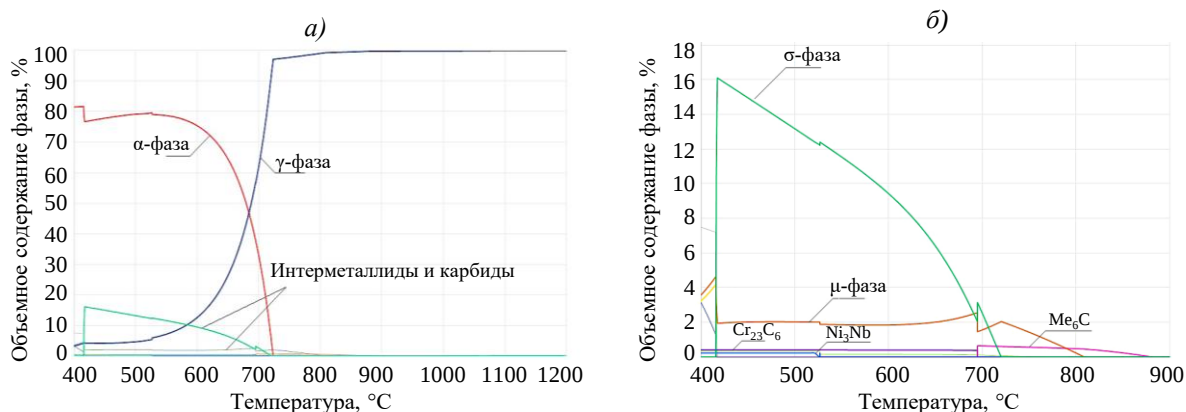


Рис. 2. Термодинамические расчеты с помощью программного обеспечения высокопрочной коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo: а – общий расчет в диапазоне температур 400–1200 °C; б – уточненная область в диапазоне температур 400–900 °C

Для исследования влияния направления синтеза и механической обработки на уровень механических характеристик проведены испытания на растяжение при температурах 20_{-10}^{+15} , 500 ± 5 и 550 ± 5 °C. Шероховатость образца до механической обработки составила $R_a = 14,1$, после механической обработки – $R_a = 0,8$. Результаты испытаний образцов представлены на рис. 3.

При анализе результатов испытаний установлено, что ориентация образцов на плите построения не оказывает существенного влияния на механические свойства, а шероховатость поверхности образцов без механической обработки снижает значения $\sigma_{0,2}$ материала при температуре 20_{-10}^{+15} °C вследствие наличия поверхностных дефектов (концентраторов напряжений) в виде припеченных порошковых частиц, характерных для синтезированного материала. Напротив, при высокотемпературных испытаниях дефекты поверхности не приводят к снижению показателей σ_b и $\sigma_{0,2}$ синтезированного материала высокопрочной мартенситостареющей коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo.

По сравнению с показателями σ_b и $\sigma_{0,2}$ шероховатость поверхности оказывает значительное влияние на относительное удлинение δ синтезированных образцов, причем в большей степени при высокотемпературных испытаниях. Отсутствие механической обработки с учетом синтеза образцов при различных ориентациях при температуре 20_{-10}^{+15} °C приводит к снижению пластичности образца на 21–30 %, при температурах 500 и 550 °C – на 64–85 и 56–67 % соответственно. Это может быть связано с более интенсивным окислением шероховатой поверхности и модификацией поверхностного слоя кислородом с дальнейшим охрупчиванием образцов.

Исследование фазового состава методом Штеблея после испытаний образцов на статическое растяжение показало, что с увеличением температуры испытания объемное содержание мартенсита снижается, а аустенита – растет (рис. 4). Нагрев до температуры испытания происходит со скоростью 15 °C/мин, т. е. выдержка образцов в интервале температур 400–500 и 400–550 °C составляет 6 и 10 мин соответственно. В соответствии с ранее проведенными исследованиями [11] установлено, что выдержка при температурах >525 °C приводит к реализации $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения, при этом для

обеспечения объемного содержания аустенита в структуре при температуре 500 °С в количестве от 6 до 10 % требуется ~3 ч времени, а от 10 до 15 % при температуре 550 °С: ~2 ч. В структуре образцов при испытании на растяжение с учетом выдержки в температурном интервале от 6 до 10 мин сформировалось среднее объемное содержание аустенита 7,5 % (при 500 °С) и 12,5 % (при 550 °С), что свидетельствует об интенсификации диффузионного процесса $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при механическом и температурном воздействии.

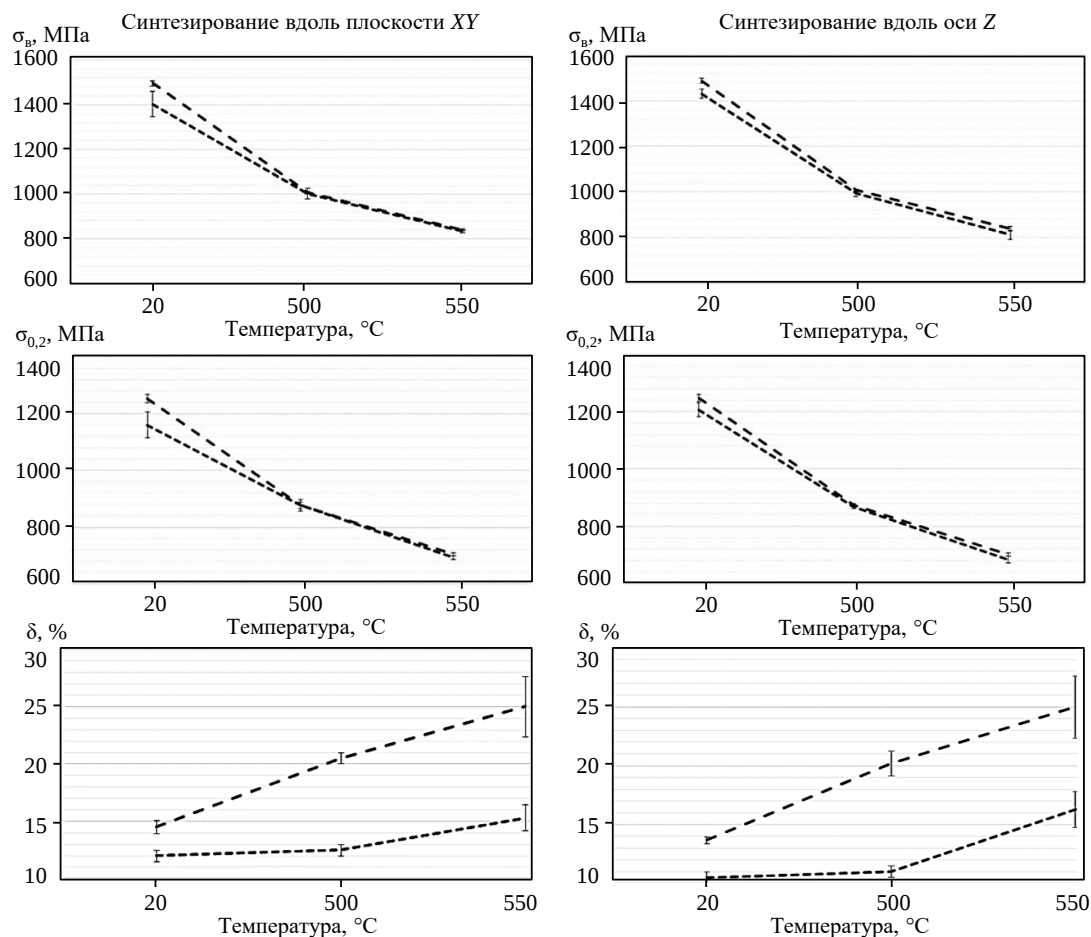


Рис. 3. Влияние направления синтезирования и механической обработки образцов на предел прочности (σ_b), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ) в зависимости от температуры испытания (---, - - - без и с механической обработкой соответственно)

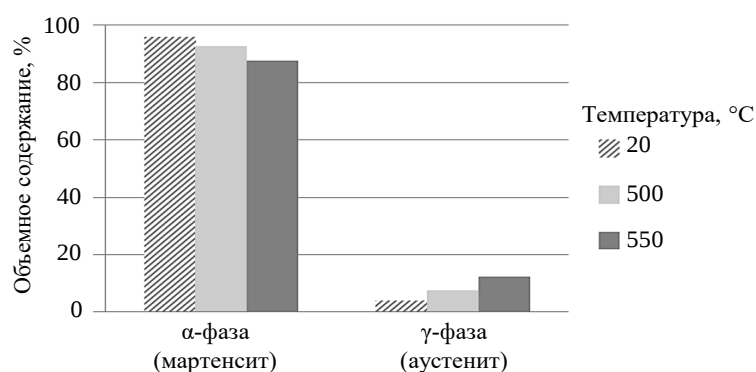


Рис. 4. Распределение фаз в образцах при различных температурах испытаний

Испытание на длительную прочность (база 100 ч) проводили при температуре 550 ± 5 °С и напряжении 480 МПа. Образцы сняты с испытательной машины до разрушения, спустя 110 ч после начала испытания.

Испытание на ползучесть (база 100 ч) проводили при температуре 500 ± 5 °С и напряжении 140 МПа с допуском на деформацию 0,2 % в соответствии с ГОСТ 3248–81.

Все испытываемые образцы сняты после 100 ч испытания без разрушения. При этом среднее значение относительного удлинения δ_0 образцов, синтезированных вдоль оси Z и плоскости XY, без механической обработки поверхности составило 0,065 %, в то время как аналогичный показатель для образцов, подвергнутых механической обработке поверхности, равен 0,055 %. Таким образом, можно сделать вывод, что шероховатость поверхности и ориентация построения образцов не оказывают значимого влияния на остаточную деформацию ползучести и свойства синтезированного материала при длительных температурных испытаниях.

Аналогичные исследования при температурах 20_{-10}^{+15} , 500 ± 5 и 550 ± 5 °С проводили путем испытаний на ударную вязкость с U-образным концентратором напряжений.

Сравнительные результаты проведенных испытаний приведены на рис. 5.

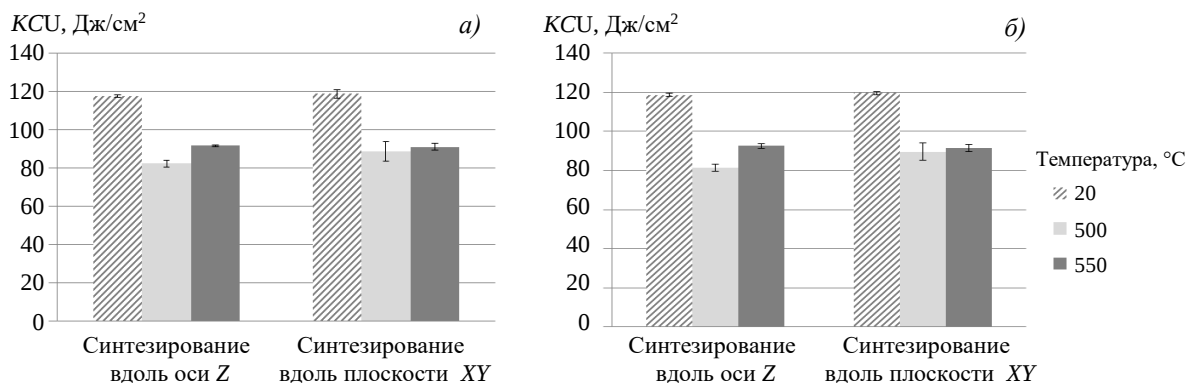


Рис. 5. Сравнение значений ударной вязкости образцов, синтезированных в различных направлениях, при различных температурах испытания: без механической обработки (а) и с применением механической обработки (б)

Исследование показало снижение ударной вязкости материала при высокотемпературных испытаниях, что предположительно связано с интенсивным образованием при данных температурах в сталях системы легирования Fe–Cr–Ni–Mo–Co σ -фазы, приводящей к повышению хрупкости и снижению ударной вязкости стали [17–21]. При этом ударная вязкость материала не зависит от исходной ориентации построения образцов при селективном лазерном сплавлении, а также от шероховатости поверхности.

Заключения

Механическая обработка незначительно влияет на пределы прочности (σ_b) и текучести ($\sigma_{0,2}$) при температуре испытания 20_{-10}^{+15} °С. Установлено, что проведение механической обработки приводит к увеличению значений параметров σ_b и $\sigma_{0,2}$ на 3–8 %. Наличие неровностей и порошковых частиц на поверхности образца после синтеза при высокотемпературных испытаниях при 500 ± 5 и 550 ± 5 °С не приводит к снижению механических характеристик.

Отсутствие механической обработки приводит к снижению значений относительного удлинения (δ) у образцов после синтеза на 21–30 % при температуре испытания 20_{-10}^{+15} °С при температурах 500 ± 5 и 550 ± 5 °С – на 64–85 и 56–67 % соответственно. Более интенсивное снижение относительного удлинения при повышенных температурах,

по-видимому, связано с активным окислением и модификацией поверхностного слоя, что приводит к охрупчиванию.

Высокотемпературные испытания на длительную прочность и ползучесть не зависят от качества поверхности образцов и ориентации построения.

Ориентация построения и наличие поверхностных дефектов не оказывают значительного влияния на ударную вязкость вследствие высокой скорости зарождения и распространения трещины при испытании. Снижение уровня механических свойств с повышением температуры, вероятно, связано с образованием σ -фазы в сталях такой системы легирования.

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. 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.
2. Специальные стали: в 2 т.; пер. с нем. / Э. Гудремон; ред. пер. А.С. Займовский, М.Л. Бернштейн, В.С. Меськин. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 741 с.
3. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. No. 11. P. 1598–1605.
4. 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: 24.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
5. Специальные стали: в 2 т.; пер. с нем. / Э. Гудремон; ред. пер. А.С. Займовский, М.Л. Бернштейн, В.С. Меськин. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 2. 532 с.
6. Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В., Обливанцев К.Д. Особенности изменения зеренной структуры в Fe–Ni–Co–Mo–Ti мартенситостареющей стали при различных схемах термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
7. 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: 25.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
8. Shin W.-S., Son B., Song W. et al. Heat treatment effect on the microstructure, mechanical properties, and wear behaviors of stainless steel 316L prepared via selective laser melting // Materials Science and Engineering: A. 2021. Vol. 806. P. 140805.
9. Liverani E., Toschi S., Ceschini L., Fortunato A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 249. P. 255–263.
10. Pei Y.T., de Hosson J.T.M. Functionally graded materials produced by laser cladding // Acta materialia. 2000. Vol. 48. P. 2617–2624.
11. Богачев И.А., Сульянова Е.А., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование микроструктуры и свойств коррозионностойкой стали системы Fe–Cr–Ni, полученной методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
12. Вознесенская Н.М., Тоннышева О.А., Елисеев Э.А. Современные конструкционные стали криогенного назначения и влияние некоторых легирующих элементов на их свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.11.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.

13. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications // *Applied physics reviews*. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 041101.
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 80. P. 414–457.
15. Tascioglu E., Khan H.M., Kaynak Y. et al. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel // *Rapid Prototyping Journal*. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 1900–1909.
16. Kaynak Y., Kitay O. Porosity, surface quality, microhardness and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel resulting from finish machining // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2018. Vol. 2. No. 2. P. 36.
17. Перкас М.Д., Струг М.Д., Русаненко В.В. Эливарные мартенситостареющие стали с высоким пределом упругости // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991. № 8. С. 40–41.
18. Wang R. Precipitation of sigma phase in duplex stainless steel and recent development on its detection by electrochemical potentiokinetic reactivation: A review // *Corrosion Communications*. 2021. Vol. 2. P. 41–54.
19. Villanueva D.M.E., Junior F.C.P., Plaut R.L., Padilha A.F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex // *Materials Science and Technology*. 2006. Vol. 22. No. 9. P. 1098–1104.
20. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part I: genesis, formation, structure // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2013. Vol. 2. P. 113–121.
21. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part II: carbides and nitrides // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2013. Vol. 2. P. 343–351.

References

1. 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.
2. *Special steels*: in 2 vols. Trans. from German. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 1, 741 p.
3. Lukin E.I., Ashmarin A.A., Bannykh I.O. et al. Effect of the Reduction during Cold Rolling on the Phase Composition, Texture, and Residual Stresses in 20Kh15AN3MD2 Steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, no. 11, pp. 1598–1605.
4. 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: October 24, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-15-29.
5. *Special steels*: in 2 vols. Trans. from German. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 532 p.
6. Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V., Oblivancev K.D. Features of changing the grain structure in Fe–Ni–Co–Mo–Ti maraging steel under different heat treatment modes. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13.
7. 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: October 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-3-14.
8. Shin W.-S., Son B., Song W. et al. Heat treatment effect on the microstructure, mechanical properties, and wear behaviors of stainless steel 316L prepared via selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 806, p. 140805.
9. Liverani E., Toschi S., Ceschini L., Fortunato A. Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 249, pp. 255–263.
10. Pei Y.T., de Hosson J.T.M. Functionally graded materials produced by laser cladding. *Acta materialia*, 2000, vol. 48, pp. 2617–2624.

11. Bogachev I.A., Sulyanova E.A., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Microstructure and properties investigations of Fe–Cr–Ni stainless steel obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-3-13.
12. Voznesenskaya N.M., Tonysheva O.A., Eliseev E.A. Modern structural steels of cryogenic purpose and influence of some alloying elements on their properties (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-3-14.
13. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 041101.
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantas K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 80, pp. 414–457.
15. Tascioglu E., Khan H.M., Kaynak Y. et al. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, vol. 27, no. 10, pp. 1900–1909.
16. Kaynak Y., Kitay O. Porosity, surface quality, microhardness and microstructure of selective laser melted 316L stainless steel resulting from finish machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, vol. 2, no. 2, p. 36.
17. Perkas M.D., Strug M.D., Rusanenko V.V. Elinvar martensitic aging steels with a high elastic limit. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1991, no. 8, pp. 40–41.
18. Wang R. Precipitation of sigma phase in duplex stainless steel and recent development on its detection by electrochemical potentiokinetic reactivation: A review. *Corrosion Communications*, 2021, vol. 2, pp. 41–54.
19. Villanueva D.M.E., Junior F.C.P., Plaut R.L., Padilha A.F. Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: austenitic, superferritic and duplex. *Materials Science and Technology*, 2006, vol. 22, no. 9, pp. 1098–1104.
20. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part I: genesis, formation, structure. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, vol. 2, pp. 113–121.
21. Knyazeva M., Pohl M. Duplex steels. Part II: carbides and nitrides. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, vol. 2, pp. 343–351.

Информация об авторах

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

Климов Владимир Сергеевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Мазалова Татьяна Анатольевна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Vladimir S. Klimov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; получена после доработки 05.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.02.2025.
The article was submitted 28.11.2024; received in revised form 05.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.02.2025

Научная статья

УДК 669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-13-30

РАЗВИТИЕ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ФИЗИЧЕСКОГО МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ НИКЕЛЕВЫХ И КОБАЛЬТОВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ*. Часть 2*Н.В. Петрушин¹, И.Л. Светлов¹, А.И. Епишин², Е.С. Елютин¹*

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

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова» РАН, Черноголовка, Московская область, Россия; isman@ism.ac.ru

Аннотация. Рассмотрено практическое применение технологии направленной кристаллизации с плоским фронтом для получения отливок с переменным по высоте химическим составом (градиентные отливки с макросегрегацией), а также для решения задач физического материаловедения жаропрочных γ' -упрочненных сплавов на основе Ni и Co. К числу таких задач относятся: установление влияния легирующих элементов Re, Ru, Ta и Al на температуры γ' -солюс, солидус и ликвидус монокристаллических никелевых сплавов, оптимизация химического и фазового состава монокристаллических сплавов на основе Ni и Co, определение влияния легирующих элементов Al и W на предел текучести при сжатии и жаростойкость кобальтовых сплавов.

Ключевые слова: направленная кристаллизация, плоский фронт роста, макросегрегация легирующих элементов, никелевые и кобальтовые жаропрочные сплавы, γ/γ' -мисфит, температуры γ' -солюс, солидус и ликвидус, предел текучести, жаростойкость

Для цитирования: Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Епишин А.И., Елютин Е.С. Развитие метода направленной кристаллизации для решения задач физического материаловедения никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-13-30.

Scientific article

DEVELOPMENT OF DIRECTIONAL SOLIDIFICATION METHOD TO SOLVE THE PROBLEMS OF PHYSICAL METALLURGY OF NICKEL- AND COBALT-BASED SUPERALLOYS. Part 2*N.V. Petrushin¹, I.L. Svetlov¹, A.I. Epishin², E.S. Elyutin¹*

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

²Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; isman@ism.ac.ru

Abstract. The review considers the practical application of the directional solidification technique with a flat front to obtain castings with height-variable chemical composition (gradient castings with macrosegregation) and to solve problems of physical metallurgy of γ' -strengthened Ni- and Co-based superalloys. Such problems include: determination of the influence of alloying elements Re, Ru, Ta and Al on the γ' -solvus, solidus and liquidus temperatures of single-crystal nickel-based alloys, optimization of the chemical and phase composition of single-crystal Ni- and Co-based alloys, determination of the influence of alloying elements Al and W on compressive yield strength and heat resistance of cobalt-based alloys.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025.

Keywords: *directional solidification, flat growth front, macrosegregation of alloying elements, nickel- and cobalt-based superalloys, γ/γ' -misfit, γ' -solvus temperature, solidus temperature, liquidus temperature, yield strength, oxidation resistance*

For citation: Petrushin N.V., Svetlov I.L., Epishin A.I., Elyutin E.S. Development of directional solidification method to solve the problems of physical metallurgy of nickel- and cobalt-based superalloys. Part 2. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-13-30.

Введение

Многокомпонентное легирование жаропрочных никелевых и кобальтовых γ' -упрочненных сплавов, литье по существующим промышленным технологиям, например, монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей и установок из этих сплавов в условиях повышенной скорости охлаждения жидко-твердой зоны отливок при кристаллизации, а также длительное воздействие повышенной температуры при эксплуатации часто приводят к фазовой нестабильности их структуры и фазового состава. Последнее связано с образованием в структуре сплавов вредных фаз различного типа: эвтектической (перитектической) $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Al})$ -фазы, фаз с объемноцентрированной кубической решеткой твердых растворов вольфрама (молибдена) (α -фазы) и с гексагональной плотноупакованной решеткой твердых растворов рения (рутения) (δ -фазы), интерметаллидных топологически плотноупакованных фаз (σ , μ , R и др.), оказывающих отрицательное влияние на служебные свойства сплавов.

Необходимость прогнозирования образования вредных фаз в существующих жаропрочных никелевых сплавах и создания фазово-стабильных композиций сплавов привела к разработке различных расчетных методов для оценки их фазовой стабильности [1–4]. Однако прогнозирование условий образования этих фаз с необходимой точностью в большинстве случаев не представляется возможным. Причины – сложность химического состава сплавов, отсутствие многомерных фазовых диаграмм состояния, неравновесные условия кристаллизации. Поэтому наряду с совершенствованием методов прогнозирования фазовой нестабильности композиций сплавов актуальными остаются экспериментальные исследования фазовых равновесий в многокомпонентных системах жаропрочных сплавов и поиск оптимальных областей их легирования. Для упрощения способов решения таких задач весьма продуктивным представляется подход, совмещающий физико-химический анализ и технологию направленной кристаллизации в режиме плоского фронта роста (нормальная направленная кристаллизация – ННК) [5–7].

В первой части данной статьи [7] отмечено, что в процессе ННК исходного (первичного) многокомпонентного сплава вследствие макросегрегации химических компонентов между твердой и жидкой фазами материал однонаправленно закристаллизованной отливки (градиентная отливка с макросегрегацией) имеет переменный вдоль высоты химический состав. Изготовив из различных по высоте участков такой отливки образцы, можно изучить концентрационные зависимости физико-химических и структурно-фазовых характеристик исследуемых сплавов и определить оптимальные области их легирования.

Основная цель второй части данной статьи – продемонстрировать возможности технологии ННК для подготовки образцов, необходимых для последующего изучения и решения некоторых актуальных задач физического металловедения сплавов на основе никеля и кобальта. К числу таких задач относятся установление влияния легирующих элементов Re, Ru, Ta и Al на температуры γ' -сolvus, solidus и liquidus

монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов, оптимизация химического и фазового состава монокристаллических никелевых и кобальтовых γ/γ' -сплавов, определение влияния легирующих элементов Al и W на предел текучести при сжатии и жаростойкость γ' -упрочненных сплавов на основе кобальта.

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

Концентрационные зависимости температур γ' -сольвус, солидус и ликвидус никелевых жаропрочных γ/γ' -сплавов с рением и рутением

Температуры γ' -сольвус (или полного растворения фазы γ' в матричном γ -твердом растворе T_{solv}), солидус T_S и ликвидус T_L (характеристические температуры жаропрочного сплава) во многих случаях определяют жаропрочность и технологические параметры сплавов на никелевой и кобальтовой основах [8, 9]. Так, температура γ' -сольвус характеризует не только термическую стабильность γ' -фазы и γ/γ' -структуру сплавов в целом, но и определяет в первом приближении их температурную работоспособность – с увеличением T_{solv} (т. е. с уменьшением растворимости γ' -фазы) возрастает высокотемпературная длительная прочность. Сплавы с более высокой температурой солидус имеют более низкую гомологическую температуру, и, следовательно, диффузионная подвижность атомов в таких сплавах будет ниже, а стабильность и жаропрочность выше. Характеристические температуры определяют и некоторые технологические свойства сплавов. В частности, способность жаропрочного сплава к монокристаллическому литью лопаток без ростовых дефектов типа «струйная ликвиация» (freckles) и с пониженной микросегрегацией легирующих элементов зависит от температурного интервала кристаллизации сплава $\Delta T_{\text{кр}} = T_{\text{кр}} - T_S$ ($T_{\text{кр}}$ – температура начала кристаллизации), который в этом случае должен быть минимальным [10]. С целью устранения химической и структурной неоднородности материала лопатки подвергаются гомогенизирующей термической обработке. Температура такой обработки выбирается на основе данных о температуре γ' -сольвус сплава, из которого изготовлена лопатка.

Если характеристические температуры никелевых сплавов традиционного легирования можно рассчитать существующими методами компьютерного моделирования с высокой точностью, то для жаропрочных Re–Ru-содержащих никелевых сплавов эти возможности ограничены недостаточной базой экспериментальных данных [11–13].

В работе [14] представлены результаты систематических исследований характеристических температур жаропрочных Re–Ru-содержащих никелевых сплавов в области концентраций, характерных для монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов V и VI поколений [15, 16].

С этой целью использовали градиентную отливку (длиной ~100 мм, диаметром 20–22 мм), полученную ННК экспериментального γ/γ' -сплава состава (% (по массе)) Ni–2,5Cr–2Mo–1,3W–8,8Ta–9Re–5,75Al–11Co–6Ru. После ННК градиентная отливка имела столбчатую однонаправленную структуру с макроскопической сегрегацией Re, Ru, Ta и Al по высоте (рис. 1). Вдоль высоты отливки в материале концентрации Re и Ru уменьшаются, Ta и Al увеличиваются, а Cr, Co, W и Mo не изменяются. Следовательно, материал градиентной отливки с изменяющимся вдоль высоты химическим составом должен иметь переменные свойства или фазовые характеристики. К ним относятся характеристические температуры T_L , T_S , T_{solv} и количество γ' -фазы в сплавах, изменение которых вдоль высоты отливки приведено на рис. 2.

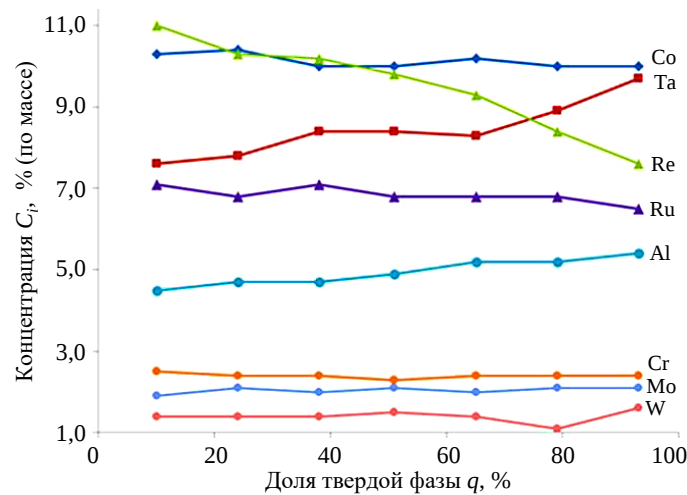


Рис. 1. Распределение концентраций легирующих элементов в сплавах по высоте градиентной отливки в зависимости от доли твердой фазы q в Re–Ru-содержащем никелевом γ/γ' -сплаве

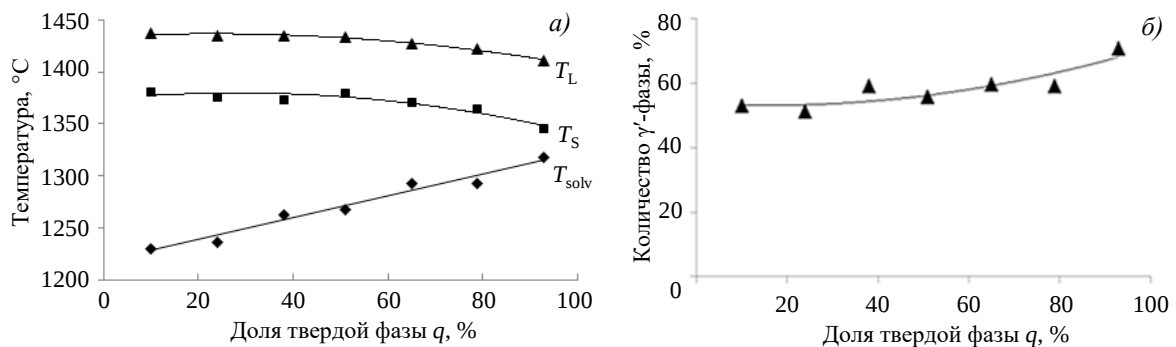


Рис. 2. Изменение температур γ' -сольвус, солидус, ликвидус (а) и количества γ' -фазы (б) по высоте градиентной отливки в зависимости от доли твердой фазы q в Re–Ru-содержащем никелевом γ/γ' -сплаве

По результатам обработки экспериментальных данных авторы работы [14] рассчитали регрессионные уравнения (модели), описывающие зависимость характеристических температур фазовых превращений T_{solv} , T_s , T_L ($^{\circ}\text{C}$) в никелевых γ/γ' -сплавах от концентраций легирующих элементов Al, Ta, Re и Ru в пределах исследованной системы легирования:

$$T_{\text{solv}} = 1263 + 29,7C_{\text{Al}} - 17,3C_{\text{Re}} + 1,2C_{\text{Ta}} + 2,5C_{\text{Ru}}, R^2 = 0,773, \quad (1)$$

$$T_s = 1160 + 21,9C_{\text{Al}} + 11,7C_{\text{Re}} - 5,5C_{\text{Ta}} + 5,5C_{\text{Ru}}, R^2 = 0,865, \quad (2)$$

$$T_L = 1291 + 5,8C_{\text{Al}} + 9,2C_{\text{Re}} + 0,4C_{\text{Ta}} + 2,7C_{\text{Ru}}, R^2 = 0,941, \quad (3)$$

где C_i (i : Al, Re, Ta, Ru) – концентрации элементов в γ/γ' -сплаве, % (по массе); R – множественный коэффициент корреляции.

Из моделей (1)–(3) следует, что для достижения максимальных значений температуры γ' -сольвус жаропрочный сплав должен быть легирован максимально возможным количеством алюминия и тантала при минимально возможном содержании рения. Рений значительно повышает температуры ликвидус и солидус, понижает температуру γ' -сольвус, а рутений слабо влияет на эти характеристические температуры γ/γ' -сплавов.

**Усовершенствование химического состава γ/γ' -сплавов
на основе никеля и кобальта
Сплав типа ЖС40**

Данный тип сплава характеризуется предельным легированием γ - и γ' -фаз, достигаемым практически равным содержанием в сплаве W, Ta и Mo ($C_W \approx C_{Ta} \approx C_{Mo}$, % (атомн.)) при повышенной их суммарной концентрации ($C_W + C_{Ta} + C_{Mo} > 18$ % (по массе)) [1, 17]. При ячеисто-дендритном росте в монокристаллических отливках из таких сплавов образуются нежелательные эвтектические $\gamma'_{эвт}$ -фазы и фазы с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой твердых растворов вольфрама (фаза α_W) или молибдена (фаза α_{Mo}) [18]. Необходимо определить концентрации легирующих элементов, гарантирующие отсутствие выделений этих фаз в сплаве ЖС40 при производстве монокристаллических лопаток по существующим промышленным технологиям литья.

В работе [6] рассмотрено применение технологии ННК с целью усовершенствования жаропрочного никелевого сплава типа ЖС40 исходного (первичного) состава (% (по массе)) Ni–5,1Al–6,5Cr–7,3W–7,3Ta–4,8Mo–0,5Nb. Материал в полученной градиентной отливке из этого сплава имел переменный по высоте химический и фазовый состав и, соответственно, физико-химические характеристики (табл. 1, рис. 3).

В начальной части отливки (рис. 3, а, табл. 1, сечение 1) наблюдали выделения α_W -фазы, в конечной (рис. 3, б, табл. 1, сечение 4) – выделения фаз $\gamma'_{эвт}$ и α_{Mo} . В интервале между ними находится искомая концентрационная двухфазная область γ/γ' -сплавов (табл. 1, сечения 2 и 3). Из данных табл. 1 следует, что сплавы, расположенные между сечениями 2 и 3 градиентной отливки, имеют более благоприятные значения характеристических температур, чем сплавы сечений 1 и 4 этой же отливки. В структуре сплавов этих сечений образуются нежелательные α - и $\gamma'_{эвт}$ -фазы.

Таблица 1

**Химический и фазовый состав и физико-химические характеристики
материалов в различных сечениях градиентной отливки
из жаропрочного никелевого сплава типа ЖС40**

Сечение отливки	Концентрация элементов, % (по массе)							Наличие фаз α и $\gamma'_{эвт}$	Доля γ' -фазы, %	T_{solv}	$T_{\text{эвт}}$	T_{S}	T_{L}
	Al	Cr	W	Ta	Mo	Nb	Ni			°C			
1	4,70	6,1	7,6	6,5	5,5	0,3	Остальное	+	54,0	1259	1313	1313	1414
2	4,90	5,9	7,5	5,9	4,9	0,4		–	55,1	1276	–	1356	1411
3	4,95	6,0	6,9	5,8	5,1	0,5		–	55,1	1269	–	1355	1409
4	5,25	6,3	7,0	7,1	5,2	0,5		+	57,2	1289	1314	1314	1394
Исходный сплав	6,15	6,5	7,3	7,3	4,8	0,5		+	59,9	1311	1316	1323	1372
Примечание. T_{solv} – температура полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе (γ' -сольвус); $T_{\text{эвт}}$ – температура начала плавления фаз эвтектического (перитектического) происхождения; T_{S} – температура солидус; T_{L} – температура ликвидус.													

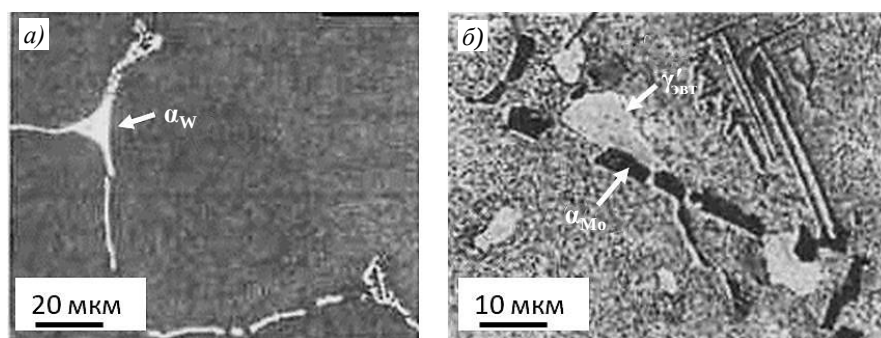


Рис. 3. Структуры начальной (а, сечение 1) и конечной (б, сечение 4) частей градиентной отливки из никелевого сплава первичного состава (% (по массе)) Ni-5,1Al-6,5Cr-7,3W-7,3Ta-4,8Mo-0,5Nb

Кобальтовый сплав Co-W-Al-Ta

В качестве альтернативы жаропрочным никелевым сплавам в последние 10–15 лет рассматриваются кобальтовые сплавы с аналогичной γ/γ' -микроструктурой, в которых матрицей является γ -твердый раствор кобальта с гранцентрированной кубической решеткой, а упрочнителем – интерметаллидные выделения Co_3Al (γ' -фаза). Однако в бинарной системе Co–Al выделения Co_3Al являются метастабильными, что неприемлемо для высокотемпературного применения. В 2006 г. в работе [19] показано, что термическую стабильность γ' -выделений в кобальтовых сплавах можно обеспечить путем легирования кобальтового сплава вольфрамом, при котором образуются стабильные γ' -выделения со стехиометрией $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ и упорядоченной структурой L1₂. Для повышения температуры γ' -сольвус предложено дополнительно легировать кобальтовый сплав танталом (табл. 2) [9, 19–26].

Таблица 2

Температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус кобальтовых и никелевых жаропрочных сплавов с γ/γ' -микроструктурой

Состав кобальтового сплава, % (атомн.)	T_{solv}	T_{S}	T_{L}	Литературный источник
	°C			
Co-9Al-10W Co-8,8Al-9,8W-2Ta	990 1084	1445 1370	– 1451	[19]
Co-9Al-9W Co-9Al-8W-2Ta Co-9Al-10W-2Ta	963 1101 1105	1446 1416 1382	1470 1440 1419	[22]
Co-9,2Al-9W Co-9,4Al-10,7W Co-8,8Al-9,8W-2Ta	1000 1033 1079	1458 1451 1407	1490 1477 1451	[23]
Co-9,4Al-10,7W Co-8,8Al-9,8W-2Ta Co-7,8Al-7,8W-4,5Cr-2Ta	– – –	1447 1407 1412	1477 1451 1453	[24]
Co-7Al-5W-2Mo Co-6Al-6W-2Ti Co-7Al-5W-2Ta Co-7Al-7W-10Cr	804 919 983 861	– – – –	– – – –	[25]
Co-11Al-5,9W-2,6Ta	1083	1346	1425	[9]
Co-13,6Al-1,9W-0,7Ta-15,9Ni-0,6Mo-0,3Re	1005	1389	1439	[26]
CMSX-4: Ni-12,6Al-2W-2,2Ta-7,6Cr-0,4Mo-9,3Co-1,3Ti-1,0Re	1286	1340	1397	[27]
ВЖМ7: Ni-13,5Al-0,8Re-2,4Mo-1,2Ta-Cr-W-Co-Ti	1290	1323	1387	[28]
Примечание. T_{solv} – температура γ' -сольвус; T_{S} – температура солидус; T_{L} – температура ликвидус.				

Примечание. T_{solv} – температура γ' -сольвус; T_{S} – температура солидус; T_{L} – температура ликвидус.

Предполагается, что для γ' -упрочненных кобальтовых сплавов можно найти ряд важных практических применений в качестве нового класса высокотемпературных материалов. Для этого имеются следующие основания [22]: жаропрочные кобальтовые сплавы обладают более высокими температурами ликвидус и солидус по сравнению с никелевыми жаропрочными сплавами (табл. 2), что делает их привлекательными для высокотемпературного применения. Вследствие достаточно небольшого интервала между температурами ликвидус и солидус они обладают необходимыми литейными свойствами и пониженной микросегрегацией компонентов по дендритным ячейкам. Это имеет особое значение при получении методами литья крупногабаритных лопаток для энергетических газовых турбин. Кобальтовые сплавы характеризуются значительным температурным интервалом γ -однофазной области (310–480 °С [22]), где они проявляют высокую пластичность и легко деформируются, что облегчает получение из них кованных или листовых материалов. С учетом отмеченных свойств жаропрочные кобальтовые γ/γ' -сплавы считаются перспективными материалами для изготовления турбинных дисков и жаровых труб, технология производства которых предусматривает деформирование при высоких температурах.

Однако термическая стабильность микроструктуры γ' -упрочненных кобальтовых сплавов существенно ниже, чем жаропрочных сплавов на основе никеля [29–31]. Кроме того, при литье они склонны к образованию выделений неравновесных эвтектик в междендритных пространствах. Так, согласно работе [32], микроструктура (рис. 4) кобальтового сплава состава (% (атомн.)) Co–9,4W–8,4Al–1,9Ta, или состава (% (по массе)) Co–24,5W–3,2Al–4,8Ta, полученного по промышленной технологии [33], в дендритах и междендритных пространствах состояла из высокодисперсных частиц интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W}, \text{Ta})$, распределенных в матричном γ -твердом растворе на основе кобальта (рис. 4, б). В междендритных пространствах отмечены крупные частицы фазы, по-видимому, эвтектического происхождения (рис. 4, а), которые образовались, по данным дифференциального термического анализа (ДТА), при температуре ~1365 °С.

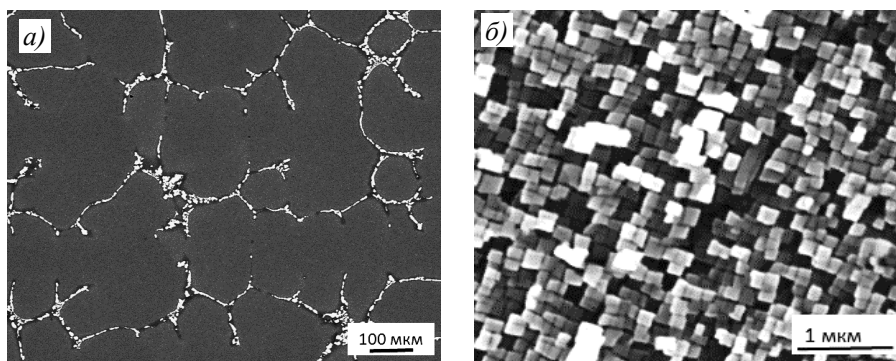


Рис. 4. Выделения эвтектических фаз (а) и γ/γ' -микроструктура (б) в литом первичном кобальтовом сплаве состава (% (по массе)) Co–24,5W–3,2Al–4,8Ta

Кривые ДТА литого сплава состава (% (по массе)) Co–24,5W–3,2Al–4,8Ta приведены на рис. 5. Их интерпретация в сопоставлении с литой микроструктурой сплава (рис. 4) позволила определить последовательность и температуры образования основных фаз при охлаждении расплава и нагреве твердого сплава. При охлаждении в интервале от 1433 до 1445 °С первично образуется кобальтовый твердый раствор в виде дендритов. Это сопровождается экзотермическим эффектом, проявляющимся на ДТА-кривой высокотемпературным пиком Д–Е (рис. 5). При дальнейшем охлаждении

на кривой ДТА наблюдается тепловой эффект превращения при температуре 1365 °С (точка Ж), связанный с выделением эвтектической фазы в междендритных областях. По данным микрозондового анализа, эта фаза имеет следующий химический состав (% (по массе)): 44,1Co–29,5W–1,3Al–25,1Ta.

На кривой ДТА при нагреве кобальтового сплава наблюдаются эндотермические тепловые эффекты превращений, связанные с растворением γ' -фазы в матричном кобальтовом γ -твердом растворе в интервале температур от ~850 до $T_{\text{solv}} = 1095$ °С (γ' -сольвус, точка А) и плавлением сплава. Выше температуры T_{solv} наблюдается локальный тепловой эффект, обусловленный началом плавления при $T_{\text{эвт}} = 1342$ °С (точка Б) эвтектической фазы, которую называют неравновесным солидусом (incipient melting) [34]. В этом случае под температурой истинного солидус сплава T_S ($T_{\text{solv}} \leq T_{\text{эвт}} \leq T_S$) подразумевается температура, ограничивающая снизу непрерывный температурный интервал плавления [35]. Для исследованного сплава на основе Со температура солидус составила 1380 °С (точка В). Его плавление заканчивается при температуре ликвидус $T_L = 1441$ °С (точка Г). Таким образом, измеренные значения характеристических температур $T_{\text{solv}} = 1095$ °С, $T_S = 1380$ °С и $T_L = 1441$ °С сплава состава (% (атомн.)) Со–9,4W–8,4Al–1,9Ta, или состава (% (по массе)) Со–24,5W–3,2Al–4,8Ta, хорошо согласуются с данными научно-технической литературы (табл. 2).

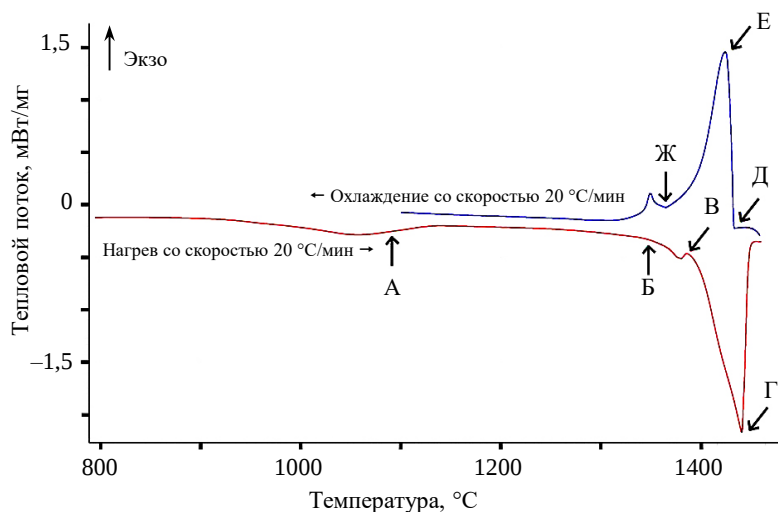


Рис. 5. Кривые дифференциального термического анализа первичного сплава состава (% (массе)) Со–24,5W–3,2Al–4,8Ta при нагреве и охлаждении (от температуры 1485 °С). Буквами отмечены температуры фазовых превращений: А – температура полного растворения γ' -фазы (температура γ' -сольвус $T_{\text{solv}} = 1095$ °С); Б – температура плавления эвтектической фазы в междендритных областях $T_{\text{эвт}} = 1342$ °С; В – температура солидус сплава $T_S = 1380$ °С; Г – температура ликвидус сплава $T_L = 1441$ °С; Д – температура начала кристаллизации сплава (образование первичных дендритов) $T_{\text{кр}} = 1433$ °С; Д–Е – температурный интервал кристаллизации первичных дендритов γ -твердого раствора; Ж – температура начала образования эвтектической фазы (1365 °С) в междендритных областях

Для предотвращения образования неравновесных эвтектик и установления двухфазной γ/γ' -области в кобальтовом сплаве в работе [32] применен метод ННК. После ННК первичного сплава состава (% (по массе)) Со–24,5W–3,2Al–4,8Ta в градиентной отливке общей высотой ~90 мм сформировалась структура, состоящая из трех характерных зон (участков). В стартовой (нижней) зоне длиной ~15 мм образовалась

дендритно-ячеистая структура кобальтового сплава с микроликвацией W и Ta, т. е. с пониженной их концентрацией в центре дендритной ячейки и повышенной – на ее периферии. В результате на границах дендритных ячеек появились неравновесные выделения интерметаллидной фазы эвтектического происхождения (светлые выделения на рис. 6, а) состава (% (по массе)) 43,2Co–34,2W–0,5Al–22,1Ta.

В зоне ориентированного (плоского фронта) роста градиентной отливки протяженностью ~45 мм в структуре кобальтового сплава отсутствуют выделения эвтектических фаз, обнаружены только две фазы – высокодисперсные частицы γ' -фазы ($\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W}, \text{Ta})$) кубоидной формы (светлые частицы на рис. 6, б) и матричный кобальтовый γ -твердый раствор. В конечной части отливки формируется дендритно-ячеистая структура кобальтового сплава с выделениями в междендритных пространствах эвтектической фазы состава (% (по массе)) 42,3Co–34,6W–0,8Al–22,3Ta (светлые частицы на рис. 6, в).

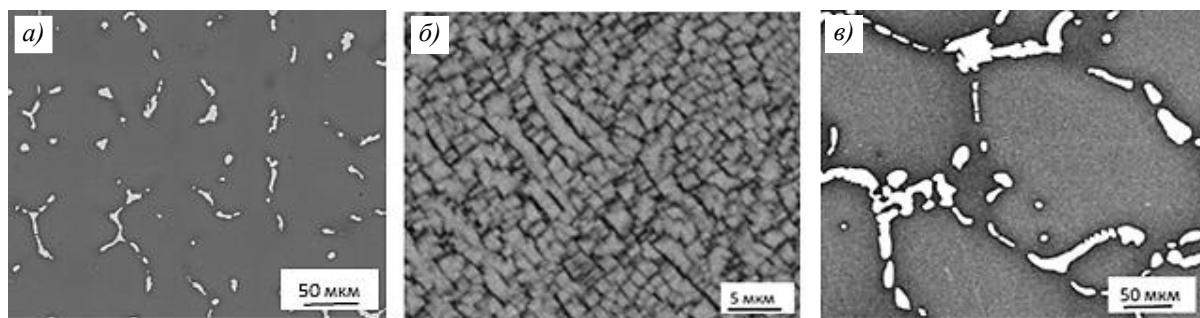


Рис. 6. Микроструктуры кобальтовых сплавов в различных сечениях градиентной отливки из первичного сплава состава (% (по массе)) Co–24,5W–3,2Al–4,8Ta: а – начальная часть отливки (доля твердой фазы $q = 11\%$, зона дендритно-ячеистого роста); б – зона плоского фронта (ориентированного) роста ($q = 50\%$); в – конечная часть отливки ($q = 80\%$, зона дендритно-ячеистого роста)

Распределение концентраций компонентов кобальтового сплава по высоте градиентной отливки в зависимости от доли твердой фазы приведено в табл. 3. Концентрации изменяются незначительно. Следовательно, в отличие от никелевых [14] кобальтовые сплавы обладают низкой сегрегационной способностью, что согласуется с данными работы [25].

Таблица 3

Распределение концентраций компонентов кобальтового сплава по высоте градиентной отливки в зависимости от доли твердой фазы

Доля твердой фазы, %	Концентрация элементов, % (по массе)		
	Al	Ta	W
Зона дендритно-ячеистого роста			
11	3,8	4,7	23,1
Зона плоского фронта роста			
33	3,4	3,9	23,5
44	3,6	4,5	23,7
50	3,5	4,6	23,6
80	3,9	4,8	23,1

В работе [32] с использованием данных рентгеноструктурного анализа для кобальтовых сплавов (табл. 3) рассчитана объемная доля γ' -фазы, оказавшаяся равной

~70 %, что согласуется с результатами работ [20, 24]. Получены экспериментальные значения характеристических температур T_{solv} , T_S и T_L , периодов решетки γ' -фазы, γ -твердого раствора и γ/γ' -мисфита этих же кобальтовых сплавов (табл. 4). Особенностью кобальтовых сплавов с γ/γ' -микроструктурой является положительный γ/γ' -мисфит

(определяемый по формуле $\delta = 2 \frac{a_{\gamma'} - a_{\gamma}}{a_{\gamma'} + a_{\gamma}}$ [36]), т. е. период кристаллической решетки для γ' -фазы больше, чем для γ -матрицы.

Таблица 4

Характеристики кобальтовых сплавов в различных зонах градиентной отливки из первичного сплава состава (% (атомн.)) Co–9,4W–8,4Al–1,9Ta в зависимости от доли твердой фазы

Доля твердой фазы, %	T_{solv}	T_S	T_L	a_γ	$a_{\gamma'}$	δ , %
	°C			нм		
11	1094	1385	1440	0,3579	0,360	0,59
44	—	—	—	0,3583	0,3599	0,46
50	1093	1386	1440	—	—	—
80	—	—	—	0,3587	0,3597	0,27

Примечание. T_{solv} – температура полного растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе (γ' -сольвус); T_S – температура солидус; T_L – температура ликвидус; a_γ и $a_{\gamma'}$ – периоды решеток γ - и γ' -фаз соответственно; δ – γ/γ' -мисфит, определяемый по формуле $\delta = 2 \frac{a_\gamma - a_{\gamma'}}{a_\gamma + a_{\gamma'}}$ [36].

При высокотемпературном длительном растяжении монокристаллов таких сплавов с аксиальной ориентацией $\langle 001 \rangle$ частицы γ' -фазы коагулируют в форме γ' -пластин, параллельных направлению приложенной нагрузки, образуя структуру так называемого Р-рафтинга [9, 37, 38]. В монокристалле жаропрочного сплава с положительным γ/γ' -мисфитом формируется композиционная γ/γ' -микроструктура, ориентированная вдоль направления приложения нагрузки, что, согласно работе [39], должно повысить его усталостную долговечность и сопротивление ползучести. Следует отметить, что жаропрочные никелевые сплавы, используемые в авиационной промышленности, имеют отрицательный γ/γ' -мисфит, определяемый по формуле, представленной в табл. 4. В таких сплавах для γ' -фазы период решетки меньше, чем для γ -матрицы. При длительном высокотемпературном растяжении монокристаллов из этих сплавов с аксиальной кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ исходные кубоидные частицы γ' -фазы сростаются в пластины, ориентированные перпендикулярно направлению приложенной растягивающей нагрузки, образуя структуру так называемого N-рафтинга [37].

В работе [40] изучали влияние небольших вариаций сплава базового состава (% (по массе)) Co–24,5W–3,2Al–4,8Ta, или состава (% (атомн.)) Co–9,8W–8,8Al–2Ta, на сопротивление пластической деформации и жаростойкость при температуре 900 °C, которая рассматривается как возможная рабочая температура в случае применения кобальтовых сплавов в качестве материала для крупногабаритных лопаток энергетических газовых турбин (рис. 7). Для повышения эффективности исследований применен метод ННК. Полученные градиентные отливки в зоне плоского фронта (ориентированного) роста имели монокристаллическую структуру с макроскопической сегрегацией легирующих элементов по высоте (рис. 7, а). Подобную, но дендритную микросегрегацию Al и W наблюдали в литом сплаве состава (% (атомн.)) Co–9Al–9W в работе [41].

После термической обработки (гомогенизация при температуре 1300 °С в течение 24 ч и старение при температуре 700 °С в течение 48 ч) сплавы в отливках имели регулярную γ/γ' -микроструктуру с кубоидными выделениями частиц γ' -фазы размером $\sim 0,2$ мкм (рис. 7, з). Из различных по высоте участков отливок изготовлены образцы (диаметром 10 мм, длиной 15 мм) для испытаний на сжатие (рис. 7, в) и образцы (диаметром 10 мм, длиной 8 мм) для изучения жаростойкости.

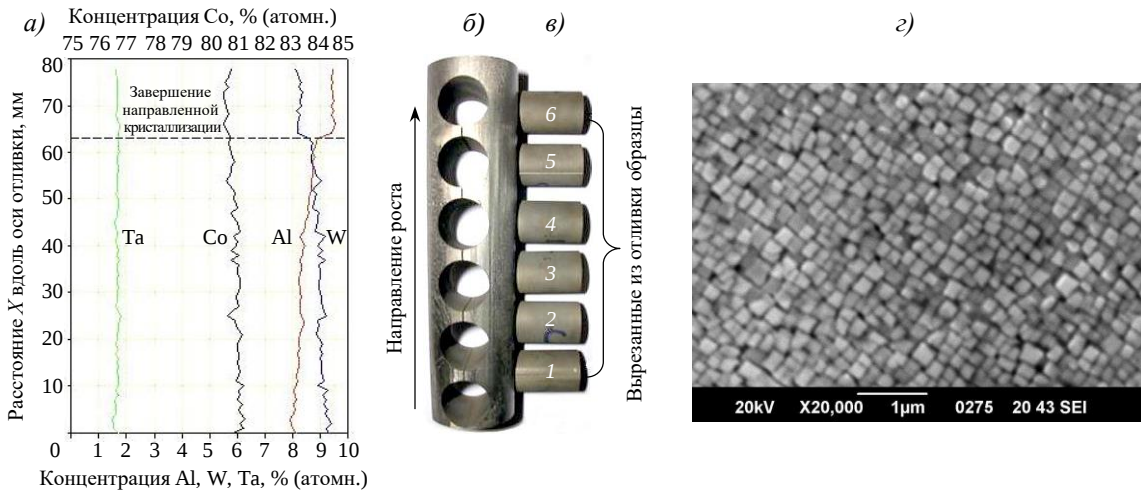


Рис. 7. Распределение легирующих элементов (а) по высоте зоны ориентированного роста градиентной отливки (б) из первичного кобальтового сплава состава (% (атомн.)) Co–9,8W–8,8Al–2Ta, цилиндрические мини-образцы различного химического состава с осевой кристаллографической ориентацией $\langle 110 \rangle$, вырезанные из этой отливки для испытаний на сжатие (в), и микроструктура сплава в отливке после термической обработки (з)

Испытания образцов на сжатие со скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = -10^{-3} \text{ с}^{-1}$ выполнены в вакууме при температуре 900 °С. Образцы нагревали путем пропускания электрического тока вдоль их оси (вставка на рис. 8, а). В качестве характеристики сопротивления пластической деформации при сжатии использовали предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором пластическая деформация составляла 0,2 %.

Результаты испытаний образцов на сжатие представлены на рис. 8, а (точки и аппроксимирующая их кривая красного цвета). Для образцов 3, 4 и 5, вырезанных из средней и конечной частей зоны ориентированного роста отливки, значения предела текучести практически одинаковы и составляют ~ 510 МПа. Однако для образцов 1 и 2, вырезанных из начальной части зоны ориентированного роста отливки, наблюдается повышение предела текучести до максимального значения (~ 560 МПа для образца 1). Такое повышение предела текучести коррелирует с повышенной концентрацией вольфрама, который улучшает сопротивление пластической деформации кобальтовых сплавов [42]. Вольфрам является эффективным упрочнителем твердых растворов с границентрированной кубической решеткой благодаря большому размеру атомов [43], увеличивает энергию антифазной границы в интерметаллиде $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ [44] и обладает низкой диффузионной подвижностью в системе Co–W–Al–Ta [45].

Испытания на жаростойкость проведены по методике периодического взвешивания образцов (ГОСТ 6130–71) через каждые 25, 50, 100, 200, 300, 400 и 500 ч окисления в воздушной атмосфере печи при температуре 900 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры вне печи. Максимальная продолжительность выдержки составила 500 ч при семи циклах «нагрева–охлаждения». Степень окисления характеризовалась увеличением массы образца, отнесенной к площади его поверхности.

Результаты испытаний образцов на окисление представлены на рис. 8, б. При температуре 900 °С образцы 1, 3 и 4, вырезанные из начальной и средней частей зоны ориентированного роста отливки, имеют практически одинаковое сопротивление окислению, тогда как для образца 6, вырезанного из конечной части зоны ориентированного роста отливки с повышенным содержанием алюминия, скорость окисления на 35 % меньше. Данный результат логичен, так как алюминий является элементом, образующим защитный слой из Al_2O_3 .

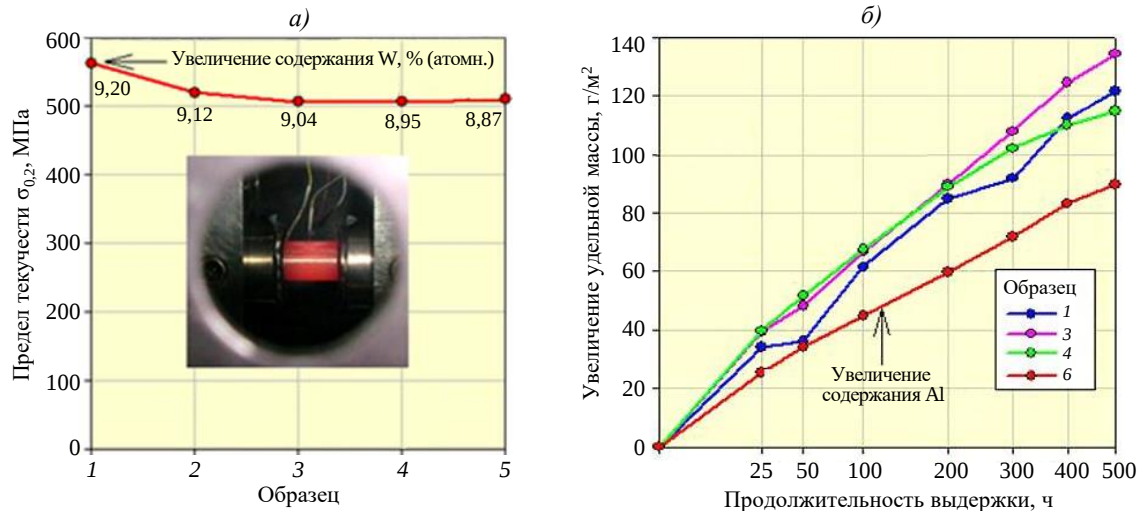


Рис. 8. Влияние W на предел текучести (а), зависимость удельной массы от продолжительности выдержки и влияние Al на сопротивление окислению (б) образцов кобальтовых γ/γ' -сплавов при температуре 900 °С. На вставке (а) показано испытание образца на сжатие

Исследование материала внутренних областей образцов после длительного отжига при температуре 900 °С показало, что γ/γ' -микроструктура сохраняется, но происходит огрубление частиц γ' -фазы. После отжига в течение 500 ч размер γ' -частиц увеличился с 0,2 мкм (в исходном состоянии, рис. 7, з) до 0,35 мкм (рис. 9, а). Однако в приповерхностной зоне образцов микроструктура материала значительно изменена (рис. 9, б).

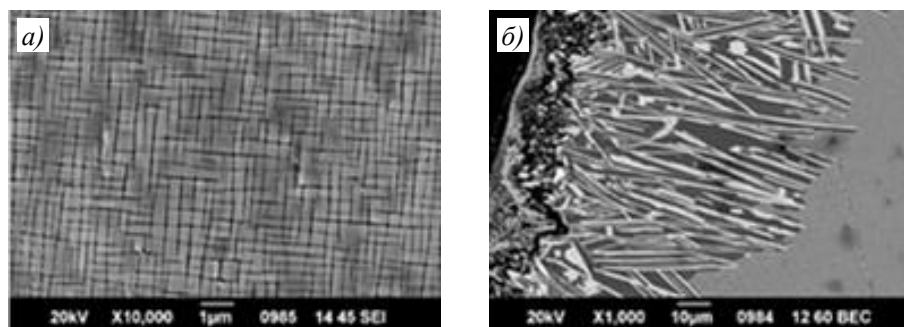


Рис. 9. Микроструктуры сплава состава (% (атомн.)) Co–9,8W–8,8Al–2Ta в направленно закристаллизованной отливке после термической обработки и последующей выдержки при температуре 900 °С в течение 500 ч: а – внутренняя область, б – приповерхностная зона

Под оксидным поверхностным слоем образца образовалась зона толщиной 1–2 мкм состава (% (атомн.)) Co–9,3W–5,8Al–1,6Ta, т. е. с пониженным по сравнению с внутренней областью содержанием алюминия (8,4 % (атомн.)). Уменьшение концентрации Al

с 8,4 до 5,8 % (атомн.) в этом слое стало результатом его оттока к поверхности с образованием на ней слоя Al_2O_3 . Следующая за ней зона толщиной 6 мкм состоит из матрицы сплава состава (% (атомн.)) $\text{Co}-5,1\text{W}-8,9\text{Al}-0,4\text{Ta}$ и пластинчатых интерметаллидных выделений Co_3X , где $\text{X} = 19\text{W}-4,3\text{Ta}-1,6\text{Al}$ (% (атомн.)). Вне этой измененной зоны наблюдается регулярная γ/γ' -микроструктура кобальтового сплава. Подобное изменение приповерхностной микроструктуры окисленных образцов кобальтовых сплавов также описано в работах [46, 47].

Заключения

В процессе ННК сплавов различных систем легирования компоненты сегрегируют в твердую и жидкую фазы в соответствии с коэффициентами распределения и типом диаграммы состояния, формируются отливки с переменным по высоте химическим составом – градиентные отливки с макросегрегацией компонентов. Применение этой технологии для никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов позволило получить следующие результаты, важные для физического металловедения:

- для образцов, вырезанных из градиентной отливки из первичного сплава состава (% (по массе)) $\text{Ni}-2,5\text{Cr}-2\text{Mo}-1,3\text{W}-8,8\text{Ta}-9\text{Re}-5,75\text{Al}-11\text{Co}-6\text{Ru}$ с переменным по высоте содержанием Re, Ru, Ta и Al (концентрации Cr, Co, W и Mo не изменяются), измерены температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус. По результатам обработки экспериментальных данных рассчитаны регрессионные уравнения для никелевой системы $\text{Ni}-\text{Cr}-\text{Mo}-\text{W}-\text{Ta}-\text{Re}-\text{Al}-\text{Co}-\text{Ru}$, позволяющие прогнозировать значения этих характеристических температур в зависимости от содержания Al, Ta, Re и Ru в концентрационной области, соответствующей монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам V и VI поколений;

- выявлена оптимальная концентрационная область легирования, обеспечивающая формирование в монокристаллических отливках жаропрочного никелевого сплава ЖС40 системы $\text{Ni}-\text{Al}-\text{Cr}-\text{W}-\text{Ta}-\text{Mo}-\text{Nb}$ с двухфазной γ/γ' -структурой и исключаящая образование выделений избыточных фаз $\gamma'_{\text{эвт}}$, α_{W} и α_{Mo} . В сплаве с γ/γ' -структурой доля γ' -фазы достигает 55,1 %, температуры γ' -сольвус, солидус и ликвидус составили 1269–1276, 1355–1356 и 1409–1411 °С соответственно;

- выявлена оптимальная концентрационная область легирования жаропрочного кобальтового сплава базового состава (% (по массе)) $\text{Co}-24,5\text{W}-3,2\text{Al}-4,8\text{Ta}$, упрочненного высокодисперсными частицами интерметаллида $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W}, \text{Ta})$ (γ' -фаза) с объемной долей ~ 70 %, что исключает образование выделений избыточных эвтектических фаз при литье монокристаллических отливок. Установлена важная особенность кобальтовых γ/γ' -сплавов: в отличие от промышленных жаропрочных никелевых сплавов они обладают низкой сегрегационной способностью и положительным γ/γ' -мисфитом (период решетки γ' -фазы больше, чем γ -матрицы). Для монокристаллов γ' -упрочненного кобальтового сплава, вырезанных из градиентных отливок, определены сопротивление пластической деформации при сжатии и циклическая жаростойкость при температуре 900 °С. Установлено, что с увеличением концентрации вольфрама с 8,6 до 9,3 % (атомн.) сопротивление пластической деформации при сжатии образцов, характеризуемое пределом текучести $\sigma_{0,2}$, повышается с ~ 510 до ~ 560 МПа, тогда как с увеличением концентрации алюминия с 8 до 9 % (атомн.) их скорость окисления снижается с $\sim 0,24$ до $\sim 0,07$ г/(м²·ч).

Продemonстрировано, что метод ННК можно эффективно применять для оптимизации химического и фазового состава, а также для исследования фазовых превращений, структурно-фазовых характеристик и физических свойств жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта.

Список источников

1. Ohno T., Watanabe R., Tanaka K. Development of a nickel-base single crystal superalloy containing molybdenum by alloy designing method // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1988. Vol. 74. No. 11. P. 133–140.
2. Harada H., Yamagata T., Nakazawa S. Design of high specific-strength nickel-base single-crystal superalloys // *High Temperature Materials for Power Engineering 1990: Proceedings of Conference held in Liege: in 2 parts*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishing, 1990. Part 2. P. 1319–1328.
3. Самойлов А.И., Морозова Г.И., Кривко А.И., Афоничева О.С. Аналитический метод оптимизации легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Материаловедение*. 2000. № 2. С. 14–17.
4. Morinaga M., Murata Y., Yukawa H. Recent progress in molecular orbital approach to alloy design // *Materials Science Forum*. 2004. Vol. 449–452. P. 37–42.
5. Вигдорович В.Н., Вольпян А.Е., Курдюмов Г.М. Направленная кристаллизация и физико-химический анализ. М.: Химия, 1976. 200 с.
6. Петрушин Н.В., Монастырская Е.В. Применение направленной кристаллизации к решению проблем разработки и оптимизации жаропрочных материалов // *Материаловедение*. 1998. № 5. С. 2–10.
7. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Епишин А.И., Елютин Е.С. Развитие метода направленной кристаллизации для решения задач физического металловедения никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов. Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2025. № 5 (147). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-3-24.
8. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2017. 854 с.
9. Epishin A., Petrushin N., Nolze G. et al. Investigation of the γ' -strengthened quaternary Co-based alloys Co–Al–W–Ta // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. Vol. 49. No. 9. P. 4042–4057. DOI: 10.1007/s11661-018-4756-3.
10. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
11. Caron P. High γ' solvus new generation nickel-based superalloys for single crystal turbine blade applications // *Superalloys 2000*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2000. P. 737–746.
12. Mills K.C., Youssef Y.M., Li Z., Su Y. Calculation of thermophysical properties of Ni-based superalloys // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 5. P. 623–632. DOI: 10.2355/isijinternational.46.623.
13. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. М.: Наука, 2006. С. 56–78.
14. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Назаркин Р.М. и др. Сегрегация легирующих элементов в направленно закристаллизованных жаропрочных никелевых сплавах, содержащих рений и рутений // *Вопросы материаловедения*. 2015. № 1 (81). С. 27–37.
15. 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: 15.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
16. 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: 15.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
17. Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы // *Машиностроение: энциклопедия в 40 т*. М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3: Цветные металлы и сплавы. Композиционные материалы. С. 519–552.
18. Петрушин Н.В., Чабина Е.Б., Дьячков Л.А. Фазовая стабильность монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов Ni–Al–Cr–W–Ta–Mo // *Металлы*. 1996. № 3. С. 104–112.
19. Sato J., Omori T., Oikawa K. et al. Cobalt-base high-temperature alloys // *Science*. 2006. Vol. 312. P. 90–91. DOI: 10.1126/science.1121738.

20. Pollock T.M., Dibern J., Tsunekane M. et al. New Co-based high-temperature alloys // *Journal of Metals*. 2010. Vol. 62. No. 1. P. 58–63. DOI: 10.1007/s11837-010-0013-y.
21. Yan H.-Yu., Vorontsov V.A., Coakley J. et al. Quaternary alloying effects and the properties for a new generation of Co-base superalloys // *Superalloys 2012: 12th International Symposium on Superalloys*. Pennsylvania: Minerals, Metals & Materials Society, 2012. P. 705–714.
22. Bauer A., Neumeier S., Pyczak F. et al. Creep properties of different γ' -strengthened Co-base Superalloys // *Materials Science and Engineering A*. 2012. Vol. 550. P. 333–341.
23. Suzuki A., Pollock T.M. High-temperature strength and deformation of γ/γ' two-phase Co–Al–W-base alloys // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. No. 6. P. 1288–1297.
24. Yan H.-Yu., Vorontsov V.A., Dye D. Alloying effects in polycrystalline γ' strengthened Co–Al–W base alloys // *Intermetallics*. 2014. Vol. 48. P. 44–53. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.10.022.
25. Tsunekane M., Suzuki A., Pollock T.M. Single-crystal solidification of new Co–Al–W-base alloys // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. P. 636–643. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.12.018.
26. Petrushin N., Hvatzkiy K., Gerasimov V. et al. A single-crystal Co-base superalloy strengthened by γ' precipitates: structure and mechanical properties // *Advanced Engineering Materials*. 2016. Vol. 17. P. 755–756. DOI: 10.1002/adem.201500088.
27. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006. 372 p. DOI: 10.1017/CBO9780511541285.
28. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2. С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
29. Meher S., Nag S., Tiley J. et al. Coarsening kinetics of γ' precipitates in cobalt-base alloys // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 4266–4276. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.03.052.
30. Lorez-Galilea I., Zenk C., Neumeier S. et al. The thermal stability of intermetallic compounds in an as-cast SX Co-base superalloy // *Advanced Engineering Materials*. 2014. Vol. 17. No. 6. P. 1–7. DOI: 10.1002/adem.201400249.
31. Епишин А.И., Петрушин Н.В., Линк Т., Нольце Г., Лощинин Ю.В., Герштейн Г. Исследование термической стабильности структуры кобальтового жаропрочного сплава, упрочненного интерметаллидными выделениями γ' -фазы // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. № 3. С. 17–22.
32. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Филонова Е.В., Назаркин Р.М. Высокоградиентная направленная кристаллизация Co–Al–W–Ta жаропрочного сплава, упрочненного γ' -фазой $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ // *Вестник РФФИ*. 2015. № 1 (85). С. 11–17.
33. Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А., Нарский А.Р. Развитие технологий и оборудования для получения лопаток горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурой // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.
34. Джер Р.Ф., Симс Ч.Т. *Металловедение сплавов на никелевой основе* // *Жаропрочные сплавы*. Пер. с англ. М.: Металлургия, 1976. С. 39–82.
35. Вертоградский В.А., Ковалев А.И., Лощинин Ю.В. Высокотемпературный термический анализ жаропрочных сплавов // *Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники*. М.: Наука, 1977. С. 195–201.
36. Glatzel U. *Microstructure and internal strains of undeformed and creep deformed samples of a Nickel-base superalloy*. Berlin: Verlag Dr. Köster, 1994. 80 p.
37. Nabarro F.R.N. Rafting in superalloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1996. Vol. 27. No. 3. P. 513–530. DOI: 10.1007/BF02648942.
38. Xue F., Zhou H., Chen X. et al. Creep behavior of a novel Co–Al–W-base single crystal containing Ta and Ti at 982 °C // *Eurosuperalloys 2014 – 2nd European Symposium on Superalloys and their Applications: MATEC Web of conferences*. Giens, 2014. Vol. 14. P. 15002. DOI: 10.1051/mateconf/20141415002.
39. Mughrabi H. The importance of sign and magnitude of γ/γ' lattice misfit in superalloys – with special reference to the new γ' -hardened cobalt-base superalloys // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 81. P. 21–29. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.08.005.

40. Epishin A.I., Petrushin N.V., Svetlov I.L. et al. Compression and oxidation testing of Co–Al–W–Ta single-crystal specimens directionally solidified with a flat front // *Mechanics of Solids*. 2024. Vol. 59. No. 1. P. 537–540. DOI: 10.1134/S0025654424602969.
41. Tomaszewska A., Oleksiak B. Microstructural characteristics of new type γ - γ' Co–9Al–9W cobalt-based superalloys in as-cast state // *Metalurgiya*. 2018. Vol. 57. No. 1–2. P. 91–94.
42. Pyczak F., Bauer A., Göken M. et al. The effect of tungsten content on the properties of L1₂-hardened Co–Al–W alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 632. P. 110–115. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.01.031.
43. Mishima Y., Ochiai S., Hamao N. et al. Solid solution hardening of nickel – role of transition metal and B-subgroup solutes // *Transactions of the Japan Institute of Metals*. 1986. Vol. 27. P. 656–664. DOI: 10.2320/matertrans1960.27.656.
44. Saal J.E., Wolverton C. Energetics of antiphase boundaries in γ' Co₃(Al, W)-based superalloys // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 103. P. 57–62. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.10.007.
45. Epishin A., Chyrkin A., Nolze G., Midtlyng J., Mayer H. M., Petrushin N., Reimers W. Interdiffusion in the face-centered cubic phase of the Co–Al–W–Ta system between 1090 and 1240 °C // *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*. 2018. Vol. 39. P. 176–185. DOI: 10.1007/s11669-018-0620-9.
46. Klein L., Bauer A., Neumeier S. et al. High temperature oxidation of γ/γ' -strengthened Co-base superalloys // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 2027–2034. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.033.
47. Yan H.-Y., Vorontsov V.A., Dye D. Effect of alloying on the oxidation behavior of Co–Al–W superalloys // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 83. P. 382–395. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.03.002.

References

1. Ohno T., Watanabe R., Tanaka K. Development of a nickel-base single crystal superalloy containing molybdenum by alloy designing method. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1988, vol. 74, no. 11, pp. 133–140.
2. Harada H., Yamagata T., Nakazawa S. Design of high specific-strength nickel-base single-crystal superalloys. *High Temperature Materials for Power Engineering 1990: Proceedings of Conference held in Liege: in 2 parts*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishing, 1990, part 2, pp. 1319–1328.
3. Samoilov A.I., Morozova G.I., Krivko A.I., Afonicheva O.S. Analytical method for optimization of alloying of heat-resistant nickel alloys. *Materialovedenie*, 2000, no. 2, pp. 14–17.
4. Morinaga M., Murata Y., Yukawa H. Recent progress in molecular orbital approach to alloy design. *Materials Science Forum*, 2004, vol. 449–452, pp. 37–42.
5. Vigdorovich V.N., Volpyan A.E., Kurdyumov G.M. *Directional crystallization and physicochemical analysis*. Moscow: Khimiya, 1976, 200 p.
6. Petrushin N.V., Monastyrskaya E.V. Application of directional crystallization to solving problems of development and optimization of heat-resistant materials. *Materialovedenie*, 1998, no. 5, pp. 2–10.
7. Petrushin N.V., Svetlov I.L., Epishin A.I., Elyutin E.S. Development of directional solidification method to solve the problems of physical metallurgy of nickel- and cobalt-based superalloys. Part 1. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-3-24.
8. Logunov A.V. *Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines*. Rybinsk: Gas turbine technologies, 2017, 854 p.
9. Epishin A., Petrushin N., Nolze G. et al. Investigation of the γ' -strengthened quaternary Co-based alloys Co–Al–W–Ta. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, vol. 49, no. 9, pp. 4042–4057. DOI: 10.1007/s11661-018-4756-3.
10. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. et al. *Single crystals of nickel heat-resistant alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1997, 336 p.
11. Caron P. High γ' solvus new generation nickel-based superalloys for single crystal turbine blade applications. *Superalloys 2000*. Minerals, Metals & Materials Society, 2000, pp. 737–746.
12. Mills K.C., Youssef Y.M., Li Z., Su Y. Calculation of thermophysical properties of Ni-based superalloys. *ISIJ International*, 2006, vol. 46, no. 5, pp. 623–632. DOI: 10.2355/isijinternational.46.623.
13. Kablov E.N., Petrushin N.V. Computer method for designing cast heat-resistant nickel alloys. *Cast heat-resistant alloys. Effect of S.T. Kishkin*. Moscow: Nauka, 2006, pp. 56–78.

14. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Nazarkin R.M. et al. Segregation of alloying elements in directionally crystallized heat-resistant nickel alloys containing rhenium and ruthenium. *Voprosy materialovedeniya*, 2015, no. 1 (81), pp. 27–37.
15. 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: July 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
16. 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: July 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
17. Kablov E.N. Casting heat-resistant alloys. *Mechanical engineering: encyclopedia in 40 volumes*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2001, vol. II-3: Non-ferrous metals and alloys. Composite materials, pp. 519–552.
18. Petrushin N.V., Chabina E.B., Dyachkov L.A. Phase stability of single crystals of heat-resistant nickel alloys Ni–Al–Cr–W–Ta–Mo. *Metally*, 1996, no. 3, pp. 104–112.
19. Sato J., Omori T., Oikawa K. et al. Cobalt-base high-temperature alloys. *Science*, 2006, vol. 312, pp. 90–91. DOI: 10.1126/science.1121738.
20. Pollock T.M., Dibbern J., Tsunekane M. et al. New Co-based high-temperature alloys. *Journal of Metals*, 2010, vol. 62, no. 1, pp. 58–63. DOI: 10.1007/s11837-010-0013-y.
21. Yan H.-Yu., Vorontsov V.A., Coakley J. et al. Quaternary alloying effects and the properties for a new generation of Co-base superalloys. *Superalloys 2012: 12th International Symposium on Superalloys*. Minerals, Metals & Materials Society, 2012, pp. 705–714.
22. Bauer A., Neumeier S., Pyczak F. et al. Creep properties of different γ' -strengthened Co-base Superalloys. *Materials Science and Engineering A*, 2012, vol. 550, pp. 333–341.
23. Suzuki A., Pollock T.M. High-temperature strength and deformation of γ/γ' two-phase Co–Al–W-base alloys. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56, no. 6, pp. 1288–1297.
24. Yan H.-Yu., Vorontsov V.A., Dye D. Alloying effects in polycrystalline γ' strengthened Co–Al–W base alloys. *Intermetallics*, 2014, vol. 48, pp. 44–53. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.10.022.
25. Tsunekane M., Suzuki A., Pollock T.M. Single-crystal solidification of new Co–Al–W-base alloys. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, pp. 636–643. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.12.018.
26. Petrushin N., Hvatzkiy K., Gerasimov V. et al. A single-crystal Co-base superalloy strengthened by γ' precipitates: structure and mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*, 2016, vol. 17, pp. 755–756. DOI: 10.1002/adem.201500088.
27. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006, 372 p. DOI: 10.1017/CBO9780511541285.
28. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Petrushin N.V., Visik E.M. Single-crystal nickel-based superalloy of a new generation with low-density. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
29. Meher S., Nag S., Tiley J. et al. Coarsening kinetics of γ' precipitates in cobalt-base alloys. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61, pp. 4266–4276. DOI: 10.1016/j.actamat.2013.03.052.
30. Lorez-Galilea I., Zenk C., Neumeier S. et al. The thermal stability of intermetallic compounds in an as-cast SX Co-base superalloy. *Advanced Engineering Materials*, 2014, vol. 17, no. 6, pp. 1–7. DOI: 10.1002/adem.201400249.
31. Epishin A.I., Petrushin N.V., Link T., Nolze G., Loshinin Yu.V., Gershtein G. Study of thermal stability of the structure of cobalt heat-resistant alloy strengthened by intermetallic precipitates of the γ' -phase. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2015, no. 3, pp. 17–22.
32. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Filonova E.V., Nazarkin R.M. High-gradient directional crystallization of Co–Al–W–Ta heat-resistant alloy strengthened by the γ' -phase Co₃(Al, W). *Vestnik RFFI*, 2015, no. 1 (85), pp. 11–17.
33. Bondarenko Yu.A., Echin A.B., Surova V.A., Narsky A.R. Development of technologies and equipment for producing blades of the hot path of gas turbine engines from superalloys with directional and single-crystal structure. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-3-14.
34. Decker R.F., Sims C.T. Metallurgy of nickel-based alloys. *Zharoprochnye splavy*. Trans. from Engl. Moscow: Metallurgiya, 1976, pp. 39–82.

35. Vertogradsky V.A., Kovalev A.I., Loshchinin Yu.V. High-temperature thermal analysis of heat-resistant alloys. *Structural and heat-resistant materials for new technology*. Moscow: Nauka, 1977, pp. 195–201.
36. Glatzel U. *Microstructure and internal strains of undeformed and creep deformed samples of a Nickel-base superalloy*. Berlin: Verlag Dr. Köster, 1994, 80 p.
37. Nabarro F.R.N. Rafting in superalloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, vol. 27, no. 3, pp. 513–530. DOI: 10.1007/BF02648942.
38. Xue F., Zhou H., Chen X. et al. Creep behavior of a novel Co–Al–W-base single crystal containing Ta and Ti at 982 °C. *Eurosuperalloys 2014 – 2nd European Symposium on Superalloys and their Applications: MATEC Web of conferences*. Giens, 2014, vol. 14, p. 15002. DOI: 10.1051/mateconf/20141415002.
39. Mughrabi H. The importance of sign and magnitude of γ/γ' lattice misfit in superalloys – with special reference to the new γ' -hardened cobalt-base superalloys. *Acta Materialia*, 2014, vol. 81, pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.08.005.
40. Epishin A.I., Petrushin N.V., Svetlov I.L. et al. Compression and oxidation testing of Co–Al–W–Ta single-crystal specimens directionally solidified with a flat front. *Mechanics of Solids*, 2024, vol. 59, no. 1, pp. 537–540. DOI: 10.1134/S0025654424602969.
41. Tomaszewska A., Oleksiak B. Microstructural characteristics of new type γ - γ' Co–9Al–9W cobalt-based superalloys in as-cast state. *Metalurgiya*, 2018, vol. 57, no. 1–2, pp. 91–94.
42. Pyczak F., Bauer A., Göken M. et al. The effect of tungsten content on the properties of L1₂-hardened Co–Al–W alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 632, pp. 110–115. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.01.031.
43. Mishima Y., Ochiai S., Hamao N. et al. Solid solution hardening of nickel – role of transition metal and B-subgroup solutes. *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 1986, vol. 27, pp. 656–664. DOI: 10.2320/matertrans1960.27.656.
44. Saal J.E., Wolverson C. Energetics of antiphase boundaries in γ' Co₃(Al,W)-based superalloys. *Acta Materialia*, 2016, vol. 103, pp. 57–62. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.10.007.
45. Epishin A., Chyrkin A., Nolze G., Midtlyng J., Mayer H.M., Petrushin N., Reimers W. Interdiffusion in the face-centered cubic phase of the Co–Al–W–Ta system between 1090 and 1240 °C. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2018, vol. 39, pp. 176–185. DOI: 10.1007/s11669-018-0620-9.
46. Klein L., Bauer A., Neumeier S. et al. High temperature oxidation of γ/γ' -strengthened Co-base superalloys. *Corrosion Science*, 2011, vol. 53, pp. 2027–2034. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.02.033.
47. Yan H.-Y., Vorontsov V.A., Dye D. Effect of alloying on the oxidation behavior of Co–Al–W superalloys. *Corrosion Science*, 2014, vol. 83, pp. 382–395. DOI: 10.1016/j.corsci.2014.03.002.

Информация об авторах

Петрушин Николай Васильевич, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Светлов Игорь Леонидович, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Епишин Александр Игоревич, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., ФГБУН «Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова» РАН, isman@ism.ac.ru

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

Information about the authors

Nikolay V. Petrushin, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Igor L. Svetlov, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Epishin, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, isman@ism.ac.ru

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

Статья поступила в редакцию 26.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.01.2025.
The article was submitted 26.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 17.01.2025.

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ

А.В. Свиридов¹, О.В. Фомичева¹, Е.В. Голев¹, О.Е. Козырева¹

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

Аннотация. Представлен обзор основных этапов разработки технологии электродуговой наплавки проволоки (Wire Ark Additive Manufacturing – WAAM). Приведен опыт применения технологии WAAM для различных групп материалов – сталей, никелевых, титановых, алюминиевых и других сплавов. Рассмотрены основные проблемные вопросы и методы улучшения качества заготовок, полученных по технологии WAAM. Преимущества технологии – низкая трудоемкость, высокие коэффициент использования материала и производительность; возможность синтеза и восстановления крупногабаритных деталей; менее наукоемкое изготовление проволоки в сравнении с металлическими порошками.

Ключевые слова: аддитивное производство, электродуговая наплавка (WAAM), дуговая сварка плавящимся электродом (GMAW), плазменно-дуговая сварка (PAW), холодный перенос металла (CMT), лазерная наплавка (LMD), аддитивная электронно-лучевая технология сварки (EBAM)

Для цитирования: Свиридов А.В., Фомичева О.В., Голев Е.В., Козырева О.Е. Аддитивное производство методом электродуговой наплавки проволоки // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45.

Scientific article

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

A.V. Sviridov¹, O.V. Fomicheva¹, E.V. Golev¹, O.E. Kozyreva¹

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 stages of development of wire arc cladding (WAAM) technology. The experience of using WAAM for various groups of materials (steel, nickel, titanium, aluminum and other alloys) is presented. The main problematic issues and methods for improving quality of workpieces obtained by WAAM technology are considered. Advantages of the technology are low labor intensity, high material utilization factor and productivity; the ability to synthesize and restore large-sized parts; less science-intensive production of wire compared to metal powders.

Keywords: additive manufacturing, wire arc additive manufacturing (WAAM), gas metal arc welding (GMAW), plasma arc welding (PAW), cold metal transfer (CMT), laser metal deposition (LMD), electron beam additive manufacturing (EBAM)

For citation: Sviridov A.V., Fomicheva O.V., Golev E.V., Kozyreva O.E. Wire arc additive manufacturing method. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45.

Введение

В данной статье рассмотрены основные способы производства изделий с использованием технологии электродуговой наплавки проволокой (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), а также опыт применения различных способов данного метода, приведены исследования российских и зарубежных специалистов, основные проблемы данного метода и пути их решения.

В настоящее время применение аддитивных технологий является одним из наиболее актуальных трендов в мировой инженерной индустрии. Благодаря использованию цифровой модели и послойному нанесению материала такие технологии позволяют изготавливать изделия сложной геометрической формы с меньшей трудоемкостью, чем при традиционных способах. Примеры таких изделий, выполненных методом WAAM, приведены на рис. 1. В сравнении с литьем и обработкой давлением способы аддитивного производства обладают более высоким коэффициентом использования материала. Изделия, изготовленные с использованием аддитивных технологий, находят применение во многих отраслях промышленности – аэрокосмической, автомобильной, медицинской и других [1–6].



Рис. 1. Изделия, полученные методом электродуговой наплавки (WAAM)

Процессы прямого подвода энергии и материала различаются в зависимости от типа сырья (металлопорошковая композиция, проволока), источника энергии (лазерный луч, электронный луч, электрическая дуга, плазма), количества источников энергии и конструкции установки (роботизированная или портальная конструкция). На рис. 2 представлена портальная установка для осуществления электродуговой наплавки [7].



Рис. 2. Портальная установка для осуществления электродуговой наплавки (WAAM)

Исходный материал подается непосредственно в ванну расплава, образованную источником тепловой энергии, в результате чего происходит послойное плавление материала в среде защитного газа либо в вакууме [8].

Технология WAAM предполагает наплавление исходного материала в виде проволоки с использованием энергии электрической дуги.

Для производства крупногабаритных металлических заготовок средней сложности технология WAAM является наиболее рентабельной. Однако основными недостатками этого процесса являются низкая точность и качество поверхности, поэтому требуются последующая обработка на станках с числовым программным управлением [9, 10].

Материалы, методы и основные результаты ***Разновидности способов технологии WAAM***

В зависимости от технологии сварки, лежащей в основе процесса WAAM, существуют три его разновидности: дуговая сварка плавящимся электродом (Gas Metal Arc Welding – GMAW) [11, 12], дуговая сварка неплавящимся электродом (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) [13, 14] и плазменно-дуговая сварка (Plasma Arc Welding – PAW) [15].

В процессе GMAW электрическая дуга возникает между плавящимся электродом (присадочной проволокой) и заготовкой. Режим передачи металла имеет важное значение в процессе WAAM на основе способа GMAW, поскольку оказывает прямое влияние на качество поверхности, микроструктуру и механические свойства материала. На рис. 3 и 4 показаны соответственно присадочная проволока и рабочая камера портальной установки, используемой для осуществления данного процесса.



Рис. 3. Присадочная проволока для электродуговой наплавки (WAAM)



Рис. 4. Рабочая камера портальной установки для осуществления электродуговой наплавки (WAAM)

Процесс GMAW–WAAM с использованием холодного переноса металла (Cold Metal Transfer – CMT) доказал свою эффективность в контролируемом режиме передачи металла и обеспечивает хороший контроль геометрических размеров и микроструктуры изделий. В процессе GMAW электрод защищен инертным газом [16, 17].

Исследование в работе [18] показало, что в ряде случаев процесс WAAM на основе способа GMAW обладает более высокими характеристиками (скоростью наплавки, коэффициентом использования материала, производительностью и экологической безопасностью) по сравнению с аддитивными технологиями на основе электронно-лучевой наплавки (EBAM), лазерной наплавки (LMD), наплавки с использованием вольфрамового электрода (GTAW) и плазменно-дуговой наплавки (PAW).

Во время процесса GTAW электрическая дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и заготовкой. Присадочная проволока подается в расплавленную ванну, созданную электрической дугой, через отдельный механизм подачи проволоки, что приводит к ее плавлению и осаждению на заготовке [19]. Скорость осаждения в процессе на основе GTAW самая низкая по сравнению с процессами WAAM на основе GMAW и PAW.

В процессе PAW дуга зажигается между вольфрамовым электродом и водоохлаждаемым соплом. Инертный газ (в основном аргон) ионизируется под воздействием электрической дуги и создает плазменную струю. Эта плазменная струя фокусируется на пластину заготовки через узкое отверстие сопла, что приводит к созданию расплавленной ванны над заготовкой. Исходная проволока подается в эту ванну, плавится и осаждается на поверхности заготовки [20]. Производительность наплавки в процессе PAW выше, чем при способе GTAW, но ниже, чем при способе GMAW.

Плазменно-дуговая наплавка (PAW) обладает наивысшей энергетической плотностью, что обеспечивает более высокую скорость перемещения электрода и меньшую деформацию сварных швов [21]. Однако, несмотря на высокое качество наплавки, процесс PAW является наиболее затратным среди процессов WAAM.

Рассмотрим основные этапы процесса WAAM. Основные критерии выбора процесса включают параметры моделирования в CAD-среде, создание траектории инструмента в процессе сварки, параметры сварочного процесса, выбор защитного газа и проволоки.

Параметры CAD-моделирования. Моделирование в CAD, 2D-разбивка 3D-модели CAD и формирование траектории инструмента являются неотъемлемыми этапами в любом процессе автоматизированного сварочного производства. В формате файла «.stl» 3D-модель легко нарезается на слои с помощью соответствующего программного обеспечения [22]. В современных установках автоматизированного сварочного производства применяется метод однонаправленной нарезки из-за его простоты. Однако этот метод имеет ограниченное применение для сложных конструкций, требующих большого количества опорных конструкций из-за сложной геометрической формы и нависающих элементов. Для минимизации использования опорных конструкций для сложных геометрических форм и нависающих элементов в последнее время в установках автоматизированного сварочного производства начали применять метод многонаправленной нарезки (MDS). При использовании этого метода нарезка выполняется таким образом, что манипулятор с несколькими координатными осями может осуществлять нанесение материала на базовую поверхность в любой ориентации, это позволяет осуществлять наплавку на нижнюю сторону выступа [16, 22]. Однако метод MDS требует использования многонаправленных наплавочных сопел, а его алгоритмы сложны, что требует полной настройки конфигурации робота [23].

Генерация траектории инструмента. Генерация траектории инструмента имеет решающее значение в процессе WAAM, поскольку она определяет движение наплавочного сопла для заполнения нарезанных 2D-слоев, представляющих поперечные сечения заготовки. Шаг смещения важен при создании траектории движения инструмента. Растровые и контурные шаблоны наиболее часто используются для методов сканирования в процессе WAAM. В растровом шаблоне смещение выполняется параллельно заданному направлению, в то время как для контурного изображения смещение происходит параллельно границе структуры. Остальные шаблоны пути представляют собой либо вариации, либо комбинации этих стратегий сканирования [24].

Наплавка методами GMAW, GTAW и PAW. Выбор метода наплавки определяется областью применения и простотой внедрения процесса. На выбор технологии наплавки влияют также требования к свойствам конечного изделия [25]. Так, способ GMAW применяется в случаях, когда приоритет отдается высокой производительности наплавки, а качество поверхности и стабильность процесса менее важны. Способ GMAW относительно проще внедрить, чем способы GTAW и PAW, поскольку он не требует отдельной подачи присадочной проволоки. Технология PAW обеспечивает высококачественные сварные швы точной формы и размера с минимальным искажением из-за высокой плотности энергии электрической дуги [26]. Деформация в результате процесса PAW минимальна. Несмотря на более высокую скорость наплавки, способ GMAW предпочтительнее для процесса WAAM, так как проволока подается соосно со сварочной горелкой, что упрощает выбор траектории инструмента. Тем не менее геометрически согласованная наплавка достижима для всех направлений движения, если угол подачи проволоки составляет 60 градусов [26].

Параметры наплавки (ток, напряжение, скорость подачи проволоки, скорость наплавки). Сварочные параметры, такие как ток, напряжение, скорость подачи проволоки и скорость наплавки, оказывают прямое влияние на сварной шов и качество наплавленной структуры. Они влияют на тепловой вклад в процессе наплавки [18]. Перенасыщение теплом во время наплавки приводит к переплавлению уже нанесенных слоев, что отрицательно сказывается на макроструктуре и геометрической форме валика. Снижение теплового вклада позволяет получить равномерную поверхность наплавки без излишнего наполнения или растекания сварочной ванны [19]. Кроме того, уменьшение теплового вклада уменьшает общую пористость наплавленной структуры за счет снижения температуры капель и уменьшения растворимости газа в расплаве [20]. Исследования макроструктуры при различных уровнях теплового вклада показали, что увеличение теплового вклада связано со снижением отношения скорости подачи проволоки к скорости перемещения инструмента [21]. В случае применения технологии WAAM важно уменьшить тепловой вклад и увеличить скорость наплавки, при этом скорость подачи проволоки должна быть пропорциональна тепловому вкладу.

Тепловой вклад в технологии WAAM оказывает значительное влияние на размер сварочной ванны. При сниженном тепловом вкладе соотношение ширины к высоте ванны уменьшается, поскольку ванна расплава не успевает расплываться до застывания. При повышенном тепловом вкладе вязкость металла уменьшается, а ванна расплава расширяется. Геометрические размеры между двумя последовательными слоями можно контролировать путем согласования охлаждения с тепловым вкладом [22].

Ток дуги существенно влияет на формирование наплавленной структуры и регулирует скорость плавления проволоки, глубину проплавления и геометрическую форму шва. Напряжение дуги также оказывает влияние на высоту и ширину структуры: при увеличении напряжения дуги увеличивается ширина и уменьшается высота [23, 24].

Выбор защитного газа. Для предотвращения образования дефектов и воздействия расплавленного металла на окружающую среду необходимо обеспечить достаточное количество защитного газа. Избыточный расход защитного газа может привести к плохому качеству сварного шва. При высокой скорости потока защитного газа, захваченные воздушные газы (кислород O_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O) из-за турбулентности могут привести к образованию пор в наплавленной заготовке. Обычно защитный газ подается через сварочную горелку. Для наплавки материалов, склонных к окислению, таких как титан (Ti) и мартенситно-старееющие стали, используют заполненные газом защитные купола [25, 26]. Локальное устройство защиты, обеспечивающее ламинарный поток защитного газа, разработано для процесса WAAM из титанового сплава состава Ti-6Al-4V (Ti64), что более эффективно по сравнению с обычной системой защиты [26]. Состав защитного газа также является важным фактором при планировании процесса WAAM для предотвращения «блуждания» тока электрической дуги в материалах с высокой реактивностью, таких как алюминиевые и титановые сплавы. Использование защитного газа с добавкой O_2 обладает несколькими преимуществами, такими как увеличение скорости перемещения инструмента, более эффективное плавление ванны расплава и снижение поверхностного натяжения расплавленного металла [26]. Исследования [19, 20] влияния состава защитного газа на процесс наплавки алюминиевых сплавов показали, что защитная смесь аргона с добавлением 0,02 % O_2 снижает «блуждание» тока электрической дуги. В работе [21] по наплавке сплава системы Ti-Al-V с предварительно измельченными зёрнами использовали защитный газ, содержащий смесь аргона и гелия, что способствовало увеличению скорости охлаждения поверхности ванны расплава.

Выбор проволоки. Выбор диаметра проволоки и количества используемых проволок оказывает влияние на скорость наплавки, теплопередачу и общее качество сварного шва.

В исследовании [22] изучали микроструктуру и механические свойства сплава системы Al-Cu-Sn, наплавленного с использованием двойной проволоки. Результаты исследований показали, что прочность наплавленного металла увеличивается, а пористость снижается при использовании двух проволок, в отличие от использования одной проволоки.

Применение нескольких подающих проволок упрощает процесс выращивания биметаллических и интерметаллидных сплавов. Например, в работе [23] для изготовления интерметаллидного сплава TiAl успешно применили процесс WAAM на основе способа PAW с двойной проволокой. Кроме того, в исследовании [24] методом GTAW-WAAM с использованием двойной проволоки получен интерметаллидный сплав системы Fe-Al.

Качество поверхности проволоки также имеет существенное значение для уровня пористости конечного изделия. Применение проволоки высокого качества без поверхностных трещин и царапин приводило к снижению пористости в сварных соединениях в проведенном исследовании в работе [25].

Важными параметрами при выборе питающей проволоки в технологии WAAM являются также состав проволоки и наличие модификаторов. Различные исследования [26] демонстрируют положительное влияние модификаторов на структуру наплавленных материалов.

Материалы, применяемые в аддитивной технологии

Титановые сплавы. Детали из титановых сплавов пользуются большим спросом в авиастроении благодаря высокому уровню механических свойств при небольшой

плотности. Из-за плохой обрабатываемости и высокой стоимости титановых сплавов возникла потребность в эффективных технологиях, альтернативных традиционным методам производства. При изготовлении деталей сложной конфигурации из сложнолегированных титановых сплавов аддитивные технологии имеют значительное преимущество – обеспечивают более высокий коэффициент использования материала (по сравнению с традиционными технологиями), что позволяет существенно снизить стоимость конечных деталей и сборочных единиц [22]. В статьях [23, 24] рассматривается процесс наплавки WAAM на основе сплава состава Ti–6Al–4V с использованием способа GTAW. Образцы с наплавкой WAAM показали хорошие механические свойства с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 884 \pm 27$ МПа, пределом прочности при растяжении $\sigma_B = 995 \pm 29$ МПа и относительным удлинением $\delta = 18,6$ %, что оказалось сопоставимым со свойствами деформируемого материала, у которого $\sigma_{0,2} = 880–920$ МПа, $\sigma_B = 900–950$ МПа, $\delta = 5–18$ %.

Сплавы на основе никеля. Никелевые сплавы обладают высокими эксплуатационными характеристиками, прочностью и ударной вязкостью при высоких температурах и устойчивы к агрессивным средам. Они применяются в авиационных двигателях, камерах сгорания и турбинах. Аддитивно изготовленные никелевые сплавы находят применение в аэрокосмической, авиационной и нефтяной промышленности [25]. В настоящее время два жаропрочных сплава на основе никеля (Inconel 718 и Inconel 625) активно изучают для процессов, основанных на технологии WAAM. Микроструктура сплава Inconel 718, изготовленного методом WAAM, обычно состоит из крупных столбчатых зерен с выделениями неправильной островной формы, известных как фазы Лавеса, и некоторых карбидов сферической/квадратной формы.

В работе [26] проводили исследование технологии WAAM сплава Inconel 718 в состоянии термической обработки и сравнили его коррозионную стойкость с аналогичной характеристикой деформированного сплава той же марки. Изучение материала показало, что этот сплав после наплавки WAAM и термической обработки обладает более низкой коррозионной стойкостью (по сравнению с деформированным сплавом той же марки) из-за образования пористого пассивного слоя, содержащего большее количество оксида NiO и меньшее количество оксида Cr₂O₃, на поверхности сплава Inconel 718 после наплавки WAAM и термической обработки. В исследовании [17] показано, что у наплавленного методом WAAM на основе процесса СМТ термически обработанного сплава Inconel 718 более стабильное поведение и удовлетворительные характеристики по сравнению со сплавом, полученным методом лазерной аддитивной печати.

В работе [18] рассмотрено применение процессов WAAM для изготовления образцов из сплава Inconel 625. Выявлено, что механические свойства полученного сплава существенно зависят от скорости перемещения горелки из-за образования выделений. Нижние слои образцов представлены в основном мелкозернистой структурой, в то время как со временем структура меняется на столбчатую дендритную с вторичными ответвлениями. Верхние слои имеют равноосную микроструктуру. После термической обработки сплава Inconel 625, изготовленного методом WAAM при температуре 1100 °С, произошло растворение фаз Лавеса, а также исчезновение классической дендритной микроструктуры [19].

Опыт НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области разработки технологии WAAM для создания заготовок из сплава ЭП718 показал высокий уровень механических свойств синтезированного сплава после горячего изостатического прессования и термической обработки: $\sigma_B = 1190$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1030$ МПа, $\delta_5 = 18,5$ %, предел кратковременной прочности при температуре 700 °С составлял 910 МПа, длительная прочность при нагрузке 400 МПа при той же температуре – более 100 ч.

Алюминиевые сплавы. После проведения нескольких исследований процесса изготовления алюминиевых сплавов по технологии WAAM сделан вывод, что этот процесс подходит в основном для производства крупногабаритных алюминиевых конструкций сложной геометрической формы. Различные марки алюминиевых сплавов, включая сплавы систем Al–Cu (2xxx), Al–Si (4xxx) и Al–Mg (5xxx), изучены для производства с использованием технологии WAAM. Некоторые марки, такие как серий 6xxx и 7xxx, имеют ограничения по сварке из-за несозревающей ванны расплава во время наплавки [20, 21]. Среди различных методов WAAM процесс СМТ на основе способа GMAW признан наиболее подходящим для изготовления алюминиевых сплавов благодаря своему эффективному энергосбережению.

В работе [22] продемонстрированы результаты успешной наплавки бездефектной тонкостенной детали из сплава марки ER4043 с применением технологии WAAM на основе процесса СМТ. При использовании оптимизированных параметров процесса получена бездефектная и полностью плотная деталь. Средняя прочность при растяжении изготовленных образцов составила 125 МПа в продольном и 112 МПа в поперечном направлениях, что сопоставимо с прочностью холоднотянутых образцов.

Стали. В настоящее время технологии WAAM уделяется внимание в ряде исследований по производству нержавеющей стали, благодаря ее способности обеспечить высокую пластичность и хорошую коррозионную стойкость металлу. По этой технологии можно производить прочные и бездефектные заготовки деталей с отличными механическими свойствами и микроструктурой. Например, в работе [23] использована технология WAAM на основе способа GMAW для наплавки нержавеющей стали марки 308L с хорошими механическими свойствами. Анизотропия в деталях может успешно устраняться с помощью подходящих процессов термической обработки, изменения вариантов процесса или использования модели ортотропного материала, что продемонстрировано в работе [24].

С помощью технологии WAAM производят комбинированную микроструктуру, состоящую из крупных столбчатых аустенитных зерен и мелких ферритных зерен скелетной, речной и зернистой формы [25]. Коррозионная стойкость обработанной методом WAAM супердуплексной нержавеющей стали марки ER2594 (SDSS) превосходит стойкость деформируемого сплава [26].

Другие сплавы. Исследования в области изготовления заготовок из магниевых сплавов с использованием аддитивного производства с проволоочной электрической дугой все еще недостаточны, и большая часть работ в области технологии WAAM выполняется на сплавах марок AZ31 и AZ91 [17]. Изготовленный методом WAAM образец из сплава AZ91 в основном состоял из равноосных зерен разного размера, с общим размером зерен, равным 13,9 и 33,2 мкм выше и ниже линии сплавления соответственно, что значительно меньше размера зерен в литом материале (44,4 мкм) [25].

Образцы, изготовленные с помощью технологии WAAM по методике Янга, не имели выявленных дефектов, обладали лучшими механическими свойствами (предел текучести 131 МПа, предел прочности при растяжении 210 МПа и относительное удлинение 10,55 %), чем традиционные литейные сплавы, и были сравнимы по свойствам с деформируемыми сплавами.

Проблемы при применении технологии WAAM

Остаточные напряжения и деформации. Значительные остаточные напряжения могут привести к деформации конструкции и быстрому разрушению изделия, а также потере геометрического допуска и снижению сопротивления усталости. Минимизация и контроль деформации, вызванной остаточными напряжениями, является важной областью исследований.

Размер подложки, используемой в технологии WAAM, и установленная система фиксации значительно влияют на продольные остаточные напряжения в структуре [21]. В работе [22] показано, что характер наплавки и длина трека оказывают влияние на остаточные напряжения. Исследования показали, что короткие треки способствуют уменьшению остаточных напряжений, в то время как спиральные пути приводят к наибольшим значениям остаточных напряжений и деформации.

Пористость. Пористость, вызванная технологическим процессом или сырьем, является дефектом, который необходимо уменьшить для предотвращения отрицательного влияния на механические свойства компонентов, изготовленных по технологии WAAM. Она возникает из-за захвата газообразного водорода в расплавленной ванне во время наплавки. Эту пористость можно в некоторой степени контролировать за счет использования подходящего состава защитного газа и методов нанесения. Наличие поверхностных загрязнений в сырье, таких как влага и жир, также является причиной образования пористости в наплавленной структуре. Кроме того, наличие пористости зависит от количества поданного тепла.

Исследования, представленные в работе [23], показывают, что в импульсном методе MIG меньшая погонная энергия приводит к более высокому уровню пористости, в то время как более высокая погонная энергия приводит к относительно меньшей пористости. Однако противоположные результаты получены в компонентах, изготовленных по технологии WAAM на основе процесса СМТ.

В работе [24] получены аналогичные результаты для процессов СМТ, СМТ + Pulse и СМТ + Advanced, где наивысший уровень подводимого тепла в процессе СМТ + Pulse привел к наибольшему образованию пор. Образование крупных столбчатых зерен также способствует предотвращению выхода пор из ванны расплава. Кроме подачи тепла, режим трансфера металла также оказывает значительное влияние на пористость конструкций, изготовленных с использованием технологии WAAM. В статье [25] демонстрируется, что при производстве сплава марки 5356Al применение импульсного режима переменного тока существенно снижает пористость, которая достигает уровня 0,13 % благодаря его переменной полярности. Полученные результаты почти в 6 раз меньше, чем при холодном трансфере металла, и в ~10 раз меньше, чем при режиме Pulsed-GMAW.

Трещины, расслоения. Растрескивание при затвердевании в основном происходит из-за избыточной сегрегации растворенных веществ, которая создает препятствия при затвердевании ванны расплава [26]. Присутствие таких дефектов отрицательно сказывается на механических свойствах изготовленной конструкции. В исследовании [17] рассмотрено влияние трещин на вязкость разрушения сплава Inconel 718, произведенного методом WAAM. Показано, что ударная вязкость сплава, изготовленного по технологии WAAM, на образцах с надрезом, параллельным трещиноподобному дефекту, почти в 2 раза меньше, чем у кованого сплава Inconel 718, но сопоставима с ним при перпендикулярном расположении надреза и трещиноподобного дефекта.

Анизотропия свойств. В процессе WAAM затвердевание способствует формированию микроструктуры с крупными столбчатыми зернами вместо мелкой равномерной микроструктуры. Это обусловлено более высоким температурным градиентом и меньшей скоростью роста на границе раздела «твердое тело/жидкость», что способствует формированию столбчатой морфологии зерен [26]. Наиболее заметным недостатком крупной столбчатой микроструктуры является наличие анизотропии механических свойств материала. В исследовании [26] изучалась анизотропия в высокопрочных стальных заготовках, изготовленных на основе процесса СМТ по технологии WAAM. Сделан вывод о более низких свойствах при разрушении в продольном направлении по сравнению с поперечным.

Методы улучшения качества производимой конструкции

Термическая и газостатическая обработка. Термическая обработка после изготовления имеет важное значение в технологии WAAM для повышения прочности материала, снижения остаточных напряжений и контроля твердости изготовленной конструкции. В работе [20] отмечается, что механическая прочность алюминиевого сплава марки AA2196, полученного методом WAAM на основе способа GTAW, увеличилась на 59 % после соответствующей последующей термической обработки и горячей деформации. Повышение свойств при растяжении связано с измельчением зерен и механизмом закрытия микропор, поскольку постобработка эффективно уменьшила пористость и устранила места зарождения трещин.

В других исследованиях, проведенных после последующей термической обработки компонентов, изготовленных с использованием технологии WAAM, сообщается об увеличении прочности на 4; 5; 78 и 17 % для титановых сплавов [21], жаропрочных сплавов на основе никеля [22, 23], алюминиевых сплавов [24] и интерметаллидных сплавов Ti/Al [25] соответственно.

Послойное (межпроходное) охлаждение. Сложный термический профиль заготовок, изготовленных методом WAAM, который включает повторяющиеся циклы нагрева и охлаждения, может привести к формированию сложных микроструктур и ухудшению механических свойств.

Для достижения улучшенной микроструктуры и повышенных механических свойств разработаны методы межпроходного охлаждения, включающие принудительное охлаждение с использованием сжатого газа CO₂. Быстрое охлаждение достигается благодаря использованию подвижного сопла для подачи газа, поэтому температура слоя, а также термический цикл могут быть изменены в желаемой области для получения требуемой микроструктуры и механических свойств.

Исследования, представленные в работе [26], по изготовлению сплава состава Ti–6Al–4V с использованием принудительного межпроходного охлаждения сжатым CO₂ показали многообещающие результаты. Оказалось, что этот процесс способствует улучшению микроструктуры, снижению окисления, увеличению твердости и укреплению материала. В работе [17] предложен метод активного охлаждения с использованием сухого сжатого воздуха при изготовлении сплава марки SS308L по технологии WAAM и получены положительные результаты, такие как самая низкая шероховатость поверхности, увеличение средней твердости и большая прочность при растяжении по сравнению с деталями, изготовленными без использования активного охлаждения.

Послойная холодная прокатка. Применение такой прокатки для наплавленных структур позволяет существенно снизить микроструктурную анизотропию за счет механизма пластической деформации материала. Исследования показали, что послойная холодная прокатка наплавленных валиков также успешно снижает остаточные напряжения и деформацию [18].

В статье [19] представлена интегрированная система метода WAAM для холодной прокатки, в которой гидравлически нагруженный целевой ролик перемещался по наплавленной металлической структуре с постоянной скоростью, аналогично сварочной горелке в процессе GMAW. Этот метод оказался эффективным для уменьшения деформации и повышения качества поверхности наплавленной структуры, минимизируя необходимость в дополнительной механической обработке конечного изделия. Подогрев прокатанного слоя и последующее нанесение слоя способствовали полезному измельчению зерен материала.

Исследования в статье [20] подтвердили положительное влияние послойной холодной прокатки при производстве сплавов состава Ti–6Al–4V методом WAAM.

Удалось достичь улучшения характеристик, таких как предел прочности при растяжении (876 МПа), предел текучести (789 МПа) и относительное удлинение (11 %), что превзошло показатели для образцов, полученных методом WAAM, в исходном состоянии. Увеличение прочности и пластичности связано с устранением пустот и повышением плотности дислокаций за счет послойной прокатки.

Аналогичные результаты получены в работе [21] при изготовлении сплава Inconel 718 методом WAAM. В настоящее время этот метод используется только для изготовления простых деталей с тонкими стенками из-за геометрических ограничений процессов прокатки в рабочей камере установки. Внедрение послойной прокатки при изготовлении готовых к использованию компонентов методом WAAM остается недоступным из-за этих ограничений.

Заключения

Технология WAAM привлекает внимание отечественных промышленных специалистов и исследователей из-за своей низкой стоимости, высоких производительности и коэффициента использования материала при изготовлении крупногабаритных деталей средней сложности.

Качество изготовления и свойства материала, полученного методом WAAM, существенно зависят от реализации выбранного метода и планирования обработки, поэтому пристальное внимание уделяется этапам и стратегии обработки параметров и инструментов. Для решения проблем возникновения анизотропной и столбчатой микроструктур в процессе WAAM необходим выбор подходящего сырья, правильное управление скоростью охлаждения с дополнительным межпроходным охлаждением и деформациями, что имеет решающее значение и дает многообещающие результаты. Поскольку микроструктура оказывает огромное влияние на механические свойства изготовленных материалов, необходимо провести более целенаправленные исследования в этой области для их внедрения в производство продуктов конечного использования.

В настоящее время имеется множество направлений для исследований в области технологии WAAM: разработка новых сплавов, таких как сплавы с высокой энтропией и магнитные сплавы; производство биметаллических сплавов и их обработка. Отмечается, что очень мало исследований проводится для отслеживания правильности геометрической формы изделий и образования дефектов во время изготовления методом WAAM. Автоматическая проверка дефектных заготовок после изготовления приводит к более высоким потерям материала и связанным с этим затратам. Поэтому подчеркивается потребность в замкнутой системе управления для обнаружения дефектов в реальном времени, что сократит общее время постобработки и сделает технологию WAAM более надежным и эффективным методом.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электрометаллургия. 2022. № 1. С. 2–12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка // Электрометаллургия. 2022. № 2. С. 2–12.

3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электromеталлургия*. 2022. № 4. С. 15–25.
4. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электromеталлургия*. 2022. № 5. С. 8–19.
5. Ходыкин Л.Г., Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Жабин А.Н. Лазерная сварка металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного тугоплавкими частицами SiC (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 12 (118). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
6. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 9 (91). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
7. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Освоение перспективных технологий сварки высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 применительно к элементам фюзеляжа // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
8. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Неруш С.В., Бондаренко С.В., Мостяев И.В. Особенности свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 12 (130). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.
9. Бенариев И., Антипов В.В., Хасиков Д.В., Оглодков М.С., Савичев И.Д., Кузнецова П.Е. Исследование структуры и свойств экономнолегированного алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc–Zr, изготовленного методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
10. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
12. Скупов А.А., Свиридов А.В., Голев Е.В., Стекольников Е.Ю. Лазерная сварка жаропрочного сплава на никелевой основе для элементов газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
13. Ding J., Colegrove P., Mechnen J. et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer Manufacturing process on large multi-layer parts // *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50. No.12. P. 3315–3322.
14. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. No. 33. P. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
15. Wu B., Pan Z., Ding D. et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement // *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. No. 35. P. 127–139.

16. Spencer J., Dickens P., Wykes C. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 1998. Vol. 212. No. 3. P. 175–182.
17. Wang Y., Chen X., Konovalov S.V. Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron Neutron Technologies. 2017. No. 11. P. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1027451017060210.
18. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. 2015. No. 81. P. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
19. Artaza T., Suarez A., Veiga F. et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres // Journal of Materials Research Technologies. 2020. No. 9. P. 15454–15466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.012.
20. Singh P., Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing // Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2001. No. 1. P. 129–142. DOI: 10.1115/1.1375816.
21. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Material Design. 2021. Vol. 202. No. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
22. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2015. No. 34. P. 8–19. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
23. Artaza T., Suarez A., Murua M. Wire arc additive manufacturing of Mn4Ni2CrMo steel: comparison of mechanical and metallographic properties of PAW and GMAW // Procedia Manufacturing. 2019. No. 41. P. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.035.
24. Ahiale G.K., Oh Y.-J., Choi W.-D. et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes // Metals and Materials International. 2013. No. 19. P. 933–939. DOI: 10.1007/s12540-013-5005-3.
25. Wu Q., Lu J., Liu C. et al. Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing // Materials Manufacturing Processes. 2017. No. 32. P. 1881–1886. DOI: 10.1080/10426914.2017.1364860.
26. Wu B., Ding D., Pan Z. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V // Journal of Material Processing Technology. 2017. No. 250. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.

References

1. 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.
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 2. Compensation and control of deviations, GIP and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 5–25.
4. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19.
5. Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Zhabin A.N. Laser welding of metal composite materials based on aluminium alloy reinforced with refractory particles SiC (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.

6. Kablov E.N., Antipov V.V., Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of electron beam welding of heat-resistant alloys EI698-VD and EP718-ID with steel 45. *Trudy VIAM*, 2020, no. 9 (91), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
7. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Perspective welding technologies of aluminum-lithium alloy V-1469 applied to fuselage panels. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
8. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Nerush S.V., Bondarenko S.V., Mostyaev I.V. Weldability features of heat-resistant aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.
9. Benarieb I., Antipov V.V., Khasikov D.V., Oglodkov M.S., Savichev I.D., Kuznetsova P.E. Study of structure and properties of sparsely alloyed aluminum alloy of Al–Mg–Sc–Zr system, produced by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
10. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Oglodkov M.S., Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Panteleev M.D. Directions of the development of promising aluminum-lithium alloys for aero-space engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
12. Skupov A.A., Sviridov A.V., Golev E.V., Stekolnikova E.Yu. Laser welding of heat-resistant alloy nickel base for gas turbine elements engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
13. Ding J., Colegrove P., Mechnen J. et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 2011, vol. 50, no.12, pp. 3315–3322.
14. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, no. 33, pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
15. Wu B., Pan Z., Ding D. et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: Properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, no. 35, pp. 127–139.
16. Spencer J., Dickens P., Wykes C. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1998, vol. 212, no. 3, pp. 175–182.
17. Wang Y., Chen X., Konovalov S.V. Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron Neutron Technologies*, 2017, no. 11, pp. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1027451017060210.
18. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 2015, no. 81, pp. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
19. Artaza T., Suarez A., Veiga F. et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research Technologies*, 2020, no. 9, pp. 15454–15466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.012.
20. Singh P., Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, no. 1, pp. 129–142. DOI: 10.1115/1.1375816.

21. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Material Design*, 2021, vol. 202, no. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
22. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, no. 34, pp. 8–19. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
23. Artaza T., Suarez A., Murua M. Wire arc additive manufacturing of Mn4Ni2CrMo steel: comparison of mechanical and metallographic properties of PAW and GMAW. *Procedia Manufacturing*, 2019, no. 41, pp. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.035.
24. Ahiale G.K., Oh Y.-J., Choi W.-D. et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes. *Metals and Materials International*, 2013, no. 19, pp. 933–939. DOI: 10.1007/s12540-013-5005-3.
25. Wu Q., Lu J., Liu C. et al. Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Materials Manufacturing Processes*, 2017, no. 32, pp. 1881–1886. DOI: 10.1080/10426914.2017.1364860.
26. Wu B., Ding D., Pan Z. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Material Processing Technology*, 2017, no. 250, pp. 304–312. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.

Информация об авторах

Свиридов Александр Владимирович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомичева Ольга Владимировна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Голев Евгений Викторович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козырева Ольга Евгеньевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Olga V. Fomicheva, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Olga E. Kozyreva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.01.2025.
The article was submitted 24.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 27.01.2025.

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕЗКИ НА СТРУКТУРУ И УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА

Р.Р. Иванов¹, О.Н. Клименко¹, И.Н. Гуляев¹, Н.В. Осияненко¹

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

Аннотация. Рассмотрены пять наиболее часто используемых методов для резки изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов. Приведены основные преимущества и недостатки каждого из них, а также конструктивные особенности и принципы работы инструментов, с помощью которых осуществляется изготовление элементарных образцов. Приведены прочностные показатели и структура углепластиков, которые изготовлены разными методами резки. С помощью метода рентгенокомпьютерной томографии проведен анализ дефектной зоны полимерного композиционного материала.

Ключевые слова: углепластик, резка углеродных полимерных композиционных материалов, прочность углеродных полимерных композиционных материалов, адгезия, полимерное связующее, рентгенокомпьютерная томография

Для цитирования: Иванов Р.Р., Клименко О.Н., Гуляев И.Н., Осияненко Н.В. Влияние различных методов резки на структуру и упруго-прочностные свойства образцов углепластика // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63.

Scientific article

THE INFLUENCE OF DIFFERENT CUTTING METHODS ON THE TEXTURE AND STRESS-RELATED PROPERTIES OF CARBON FIBER SAMPLES

R.R. Ivankov¹, O.N. Klimenko¹, I.N. Gulyaev¹, N.V. Osiyanenko¹

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 treats the five most commonly used methods for cutting products and structures made of polymer composite materials and provides the main advantages and disadvantages of each of them. This article also outlines the design features and principles of operation of each type of tool, with which the manufacture of standard test samples is carried out. The strength parameters and structure of carbon fiber plastics, which were made by different cutting methods, are given. Using the method of X-ray computed tomography, the analysis of the defective zone of the polymer composite material was carried out.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics, cutting of carbon fiber polymer composite material, strength properties of carbon fiber polymer composite material, adhesion, polymer binder, X-ray computed tomography

For citation: Ivankov R.R., Klimenko O.N., Gulyaev I.N., Osiyanenko N.V. The influence of different cutting methods on the texture and stress-related properties of carbon fiber samples. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63.

Введение

В XXI веке значительно увеличился спектр задач по изготовлению новых изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). В настоящее время конструкторы используют новые методы по созданию конструкций, креплений, деталей из стекло- и углепластиков. Использование данных материалов позволяет снизить массу изделий и повысить прочность некоторых узлов и агрегатов летательных аппаратов. Так, доля ПКМ в современном узкофюзеляжном самолете отечественного производства МС-21 составляет >50 %. Следует учитывать и то, что углепластики также востребованы при производстве автомобилей и ракетно-космической техники [1–5].

Индустрия полимеров активно развивается, появляются новые технологии по созданию клеев, препрегов, различного вида связующих и композиционных материалов [6–8]. Оценка свойств разрабатываемых и производимых материалов – это важная часть научно-технического и производственного процесса, поэтому одной из важных операций при изготовлении образцов является резка. На данный момент существует несколько методов обработки стекло- и углепластиков и каждый из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки [9–30].

Процесс резки ПКМ отличается от аналогичной операции для металлов, что связано со структурными и физическими особенностями композиционных материалов:

- разрушение структуры такого материала происходит в виде трещин, которые в процессе механического воздействия разрастаются, что свидетельствует о наличии ярко выраженной анизотропии структуры; при резании ПКМ также выделяется большое количество мелкодисперсной фракции;
- высокая твердость ПКМ вызывает сопротивление резанию и затрудняет процесс, что приводит к изнашиванию режущего инструмента;
- в процессе резания ПКМ происходит разрушение химических связей вследствие термической деструкции, при этом выделяются газообразные продукты, которые вредны для здоровья человека.

Цель данной работы – исследование влияния различных видов резки ПКМ на структуру и упруго-прочностные свойства образцов углепластика.

В последнее время самым распространенным методом изготовления образцов из ПКМ является фрезерование и резка алмазным диском [9, 10, 16–18, 20]. Однако следует обратить внимание на то, что данные виды обработки вредны для здоровья человека, так как в процессе резания образуются мелкодисперсные частицы, которые способны проникать в легкие при дыхании [10, 25]. Именно поэтому операторы станков с ЧПУ и механической резки алмазным диском всегда должны обеспечиваться средствами индивидуальной защиты, такими как респираторы, очки, плотные технические халаты, перчатки для защиты рук, а также каждое рабочее место должно быть снабжено вентиляцией [20].

Поскольку ПКМ являются анизотропными материалами, то в процессе фрезерования и резки алмазным диском часто возникает расслоение материала, при этом происходит разрушение внутренней структуры материала. Так как угле- и стеклопластики обладают высокими показателями модуля упругости, то в процессе механической резки изнашиваются кромки режущих инструментов – сверл, фрез, алмазных дисков. При механической обработке материала разрушаются молекулярные связи в полимерных цепях, а также возникает термодеструкция из-за сильного разогрева режущего инструмента [11, 20]. Для того чтобы уменьшить давление на инструмент и снизить его износ зачастую прибегают к подаче охлаждающей жидкости. Для резки ПКМ с высоковязкими матрицами данное условие является обязательным [20].

Алмазный круг на 80 % состоит из меди, а его кромка – из мягкого сплава, в который в процессе плавления вставлены частицы алмаза. Размеры дисперсных частиц алмаза составляют до 0,5 мм. Для резки ПКМ необходимо учитывать тот факт, что круги с крупными зёрнами способны быстро разрезать, но обладают свойством травмировать поверхность изделия [20].

Важными параметрами при резке плит и изделий из ПКМ алмазными дисками являются:

- наличие и вид охлаждающей жидкости;
- скорость движения образцов навстречу диску;
- скорость вращения алмазного круга;
- геометрические размеры, форма и вид ПКМ;
- зернистость;
- угол, при котором осуществляется резка изделия;
- усилие подачи или закрепления ПКМ;
- физическое состояние режущего инструмента (температура, износ, дефекты).

На рис. 1 представлено схематическое изображение фрагмента алмазного диска.

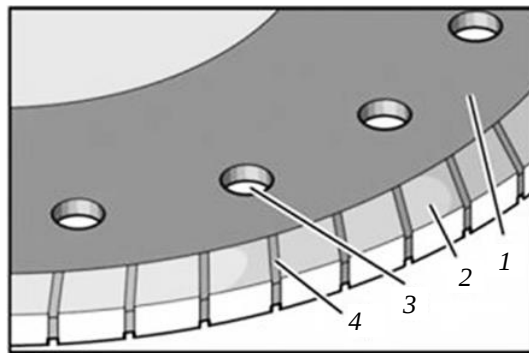


Рис. 1. Схематическое изображение фрагмента диска: 1 – тело диска; 2 – лента сегментов; 3 – отверстие для амортизации вибрации; 4 – углубление в сегментах

Чем сильнее изнашивается режущий диск, тем больше образцы на основе углеродных и стеклянных тканей будут иметь механических дефектов, таких как заусенцы, сколы, вытягивание волокон и микротрещины [9–11, 18, 20, 22]. Именно поэтому инструмент необходимо содержать в чистоте, а в случае его износа быстро и своевременно заменять.

В статье [20] изложены следующие основные требования, предъявляемые к станку для резки ПКМ:

- скорость движения алмазного круга – не более 2700 об/мин;
- наличие охлаждающей жидкости для меньшего повреждения ПКМ и его поверхности;
- наличие вентиляции и постоянный контроль режущего инструмента во избежание его износа.

Выполнение этих пунктов позволит изготавливать образцы, которые соответствуют требованиям стандартов (ГОСТ, ASTM и EN) для различных видов испытаний. Алмазный круг наиболее часто используется при изготовлении прямоугольных образцов.

Процесс фрезерования является одним из самых часто используемых видов механической обработки ПКМ [23–33] и, так же как и другие методы механической обработки, имеет свои преимущества и недостатки. В настоящее время проводятся активные работы по расчету и математическому моделированию процесса фрезерования ПКМ. Представляет интерес расчет методом конечных элементов нагрузки, температур воздействия режущего инструмента и температуры ПКМ во время механической обработки [25, 26, 29–31, 33, 34], а также влияние геометрического размера фрезы на результаты механической обработки изделий [32]. Данный вид механической обработки так же вреден для здоровья человека, как и резка алмазным кругом [25].

Самыми существенно выраженными недостатками метода фрезерования ПКМ на станке с ЧПУ являются:

- вибрация и биение фрезы во время механической обработки ПКМ, что может привести к ее износу [25, 28];
- уменьшение силы разрезки ПКМ во время длительной работы и износа режущего инструмента [25, 26];
- повышение температуры и перегрев режущего инструмента в процессе работы [25, 26];
- срыв или поломка фрезы при долгой работе станка с ЧПУ [25, 28, 32, 33];
- термическая деструкция полимерной матрицы в ПКМ в результате долгого воздействия повышенных температур [33, 34];
- расслаивание изделий из-за вибрационных нагрузок во время резки [26];
- образование заусенцев, сколов и других видов дефектов [25–27, 33, 34].

Поскольку в процессе фрезерования возникает существенное абразивное воздействие на инструмент, появляется необходимость углублять оснастку для изготовления деталей, изделий и образцов на 3–5 мм. В настоящее время чаще всего используются рашпильные фрезы (рис. 2), которые позволяют достигнуть чистого реза при высоких скоростях подачи ПКМ [33].



Рис. 2. Рашпильная фреза для резки ПКМ

Одними из недостатков таких фрез являются легкость засорения канавок, а также разрушение и истирание кончиков зубьев [33]. Из-за постоянного воздействия углеродного волокна на инструмент изнашивается его покрытие, что в свою очередь негативно воздействует на режущую кромку. Это приводит к расслаиванию материала и снижению физико-механических свойств ПКМ.

Таким образом, использование метода фрезерования для механической обработки ПКМ требует основательного подхода и учета всех ограничений, связанных со скоростью, температурой разогрева и прочностью режущего инструмента.

Гидроабразивная резка является одним из самых перспективных методов обработки, так как имеет уникальные технологические свойства [10, 12–16]. Данный вид резки образцов позволяет получать изделия из ПКМ с высокой точностью и по сравнению с механическим методом является более благоприятным с точки зрения экологии и здоровья человека.

Принцип работы гидроабразивного станка достаточно прост. Вода под высоким давлением попадает в специальную трубку для смешивания с абразивом. После смешивания воды с абразивом смесь подается под большим давлением на поверхность материала, который необходимо разрезать. Схема работы станка представлена на рис. 3. Режущая струя калибруется с помощью сопла.

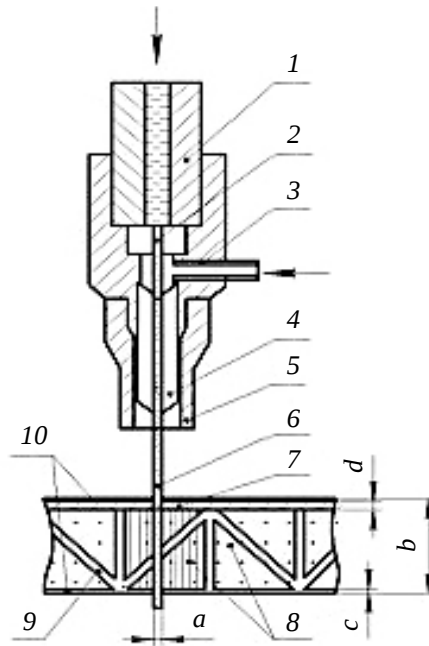


Рис. 3. Схема гидроабразивного станка: a – толщина реза; b – толщина изделия из ПКМ; c – толщина обшивки; d – толщина металлической вставки; 1 – магистраль для подвода воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – патрубок для подачи абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя воды с абразивом; 7 – металлическая вставка в панели из ПКМ; 8 – внутренняя структура панели из разнородных наполнителей; 9 – внутреннее ребро жесткости панели; 10 – верхняя и нижняя обшивки панели [21]

В авиационной и ракетно-космической отраслях гидроабразивная резка применяется достаточно часто, так как позволяет проводить операцию резания любых материалов различной толщины. Данный процесс характеризуется высокой производительностью, экологичностью, безопасностью, высоким качеством поверхности реза, а также возможностью обработки деталей разной геометрической формы [15]. Правильная настройка подачи абразивной жидкости может минимизировать тепловое воздействие. Это одно из важных преимуществ гидроабразивной резки по сравнению с механической, лазерной и ультразвуковой резкой. Именно на данные технологические преимущества обращают внимание производители ПКМ для стратегически важных отраслей промышленности. Гидроабразивная резка обеспечивает шероховатость $R_a = 1,6$ мкм [10], в то время как при механической резке она может достичь $R_a = 6,3$ – $12,5$ мкм [22].

Однако данный метод обладает существенным недостатком из-за начального гидроудара по материалу, который зачастую приводит к его расслаиванию [10, 16]. Следует отметить, что гидроабразивная резка является малоизученным процессом, а на результат обработки ПКМ влияет ряд технологических параметров, таких как: давление, создаваемое в процессе резки; размер и вид сопла; твердость; расход и вид абразивного материала, а также расстояние разрезаемого материала от сопла [15]. Согласно данным, полученным в статье [13], если в структуре ПКМ наблюдаются поры, то гидроабразивная обработка может привести к их увеличению, а впоследствии – к ухудшению физико-механических свойств изделия. Одним из недостатков также является невозможность обрабатывать глухие отверстия [13].

При использовании гидроабразивной резки имеется ряд особенностей, таких как:

- необходимость в обеспечении зазора между соплом и поверхностью материала для образования гидроабразивной струи и отвода гидроабразивной смеси [9, 16];

– трудность при изготовлении толстостенных деталей с ровными по всей толщине краями, так как режущая струя воды при движении в глубину теряет интенсивность и цепляется за слои пластика [17, 18, 21];

– необходимость ограниченного использования воды в качестве режущего инструмента, поскольку в структуре ПКМ имеются поры [12].

В последнее время возникла потребность в создании траекторий резания, которые позволят исключить возможность попадания воды между слоями, чтобы избежать ослабления конструкций – особенно сотовых на основе ПКМ [21].

Согласно данным, полученным в статье [12], при правильном проведении процесса гидроабразивной резки она не оказывает негативного влияния на структуру и механические свойства ПКМ.

Таким образом, гидроабразивная обработка является перспективным методом для проведения резки образцов, так как менее всего повреждает поверхность и оказывает наименьшее тепловое воздействие на ПКМ. Однако водное охлаждение может отрицательно влиять на свойства композиционного материала, поскольку некоторые ПКМ могут быть пористыми или влагопоглощающими.

Лазерная резка является одним из редко используемых методов для резки ПКМ, так как для проведения данного процесса применяется слишком дорогостоящее оборудование. В процессе лазерной обработки ПКМ также существуют некоторые трудности из-за различия свойств полимерной матрицы и наполнителя [14, 16, 35].

При лазерной резке в качестве режущего инструмента используется сфокусированный луч света. Данный метод отличается размером реза, который находится в интервале от 0,2 до 0,8 мм. Одним из преимуществ лазерной обработки является возможность точного автоматического управления процессом [14]. Следует отметить, что по сравнению с механическими методами обработки материалов и методом гидроабразивной резки во время резания лазерным лучом отсутствуют силы резания, которые приводят к появлению в ПКМ внутренних напряжений и остаточных деформаций.

Согласно данным работы [14], наиболее оптимальные результаты достигаются при резке ПКМ с использованием длины волны лазера в ультрафиолетовом диапазоне.

Наиболее распространенные недостатки лазерной резки:

- возникновение зоны термического влияния на кромках реза [14];
- термическая деструкция полимерной матрицы из-за сильного перегрева и образование дефектного слоя [14, 16, 36];
- расслоение и наличие угла разреза, если изделие является толстостенным [14, 16, 35].

Размеры зоны термического влияния, глубина и ширина реза, деструкция матрицы и волокна уменьшаются с увеличением скорости работы и мощности лазерной установки [35]. В статье [35] показано, что зона термического влияния также зависит и от режима лазера – непрерывного или импульсного [35, 36].

При лазерной резке образцов следует учитывать такие параметры, как [35]: продолжительность взаимодействия лазера с ПКМ, плотность мощности лазера, степень отверждения полимерной матрицы в ПКМ, интенсивность пучка и фокусировка лазера, режим работы и способность ПКМ поглощать энергию лазерного излучения.

В последнее время ведутся работы по поиску оптимальных параметров резки и 3D-моделированию разных видов ПКМ, чтобы составить рекомендации по оптимальному сочетанию данных параметров [16, 35–37].

Еще одним бесконтактным методом резки является электроэрозионная обработка, которая также позволяет проводить резку изделий и образцов из ПКМ [19, 38–42]. В данном случае этот метод можно применять только для материалов с ограниченной теплопроводностью. В настоящее время отсутствуют технологические рекомендации по

изготовлению образцов ПКМ отечественного производства методом электроэрозионной обработки [19]. В исследованиях, приведенных в данной статье, этот метод не рассматривается.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [43, 44].

Материалы и методы

Объектом исследований выбран углепластик марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе высокодеформативного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и равнопрочной углеродной ткани саржевого переплетения. Плиты углепластика изготавливали методом автоклавного формования при конечной температуре формования 180 °С и удельном давлении 0,7 МПа.

На рис. 4–7 представлены виды установок для изготовления образцов разными методами.

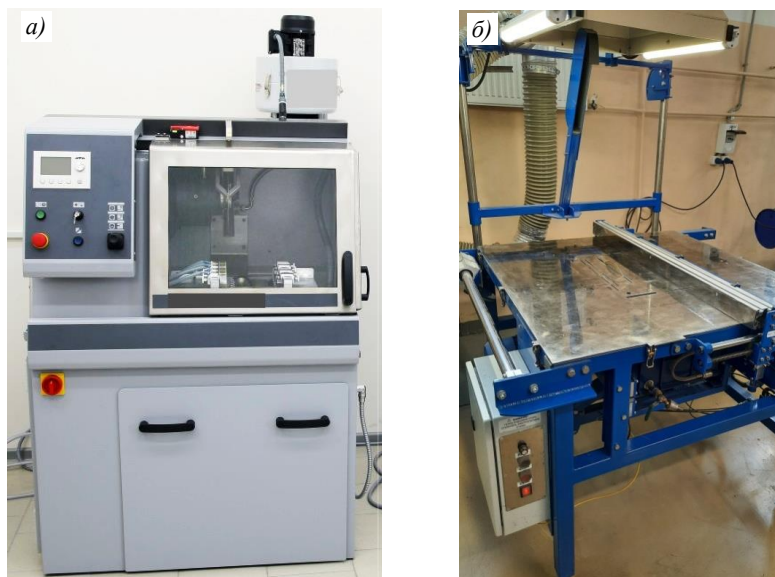


Рис. 4. Станки для резки ПКМ алмазным диском с водяным охлаждением (а) и без охлаждения (б)



Рис. 5. Станок гидроабразивной резки ПКМ



Рис. 6. Фрезеровочный станок для изготовления элементарных образцов углепластика

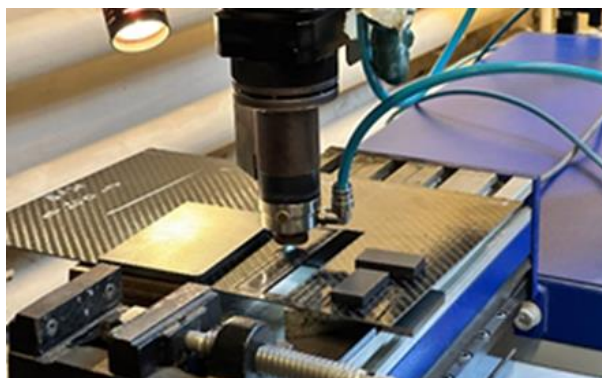


Рис. 7. Процесс изготовления образцов ПКМ методом лазерной резки

Образцы ПКМ для испытаний на трехточечный изгиб изготавливали из плит углепластика пятью способами резки:

- алмазным диском с водяным охлаждением со скоростью вращения диска 2500 об/мин (рис. 4, а);
- алмазным диском без водяного охлаждения со скоростью вращения диска 1450 об/мин (рис. 4, б.);
- с помощью гидроабразивной смеси на автоматическом двухкоординатном станке со скоростью движения рабочей головки 300 мм/мин, давлении 330 МПа, диаметре сопла 2 мм (рис. 5);
- фрезерованием на автоматическом трехкоординатном станке со скоростью движения фрезы 350 мм/мин (рис. 6);
- лазерной резкой на автоматическом двухкоординатном станке с длительностью импульса 2 мс, частотой 15 Гц, скоростью резания 1 мм/с и пиком мощности 80 % (рис. 7).

Полученные образцы измеряли с помощью штангенциркуля (ГОСТ 166–89) и микрометра (ГОСТ 6507–90).

Для определения физико-механических показателей композита использовали метод статического трехточечного изгиба согласно ГОСТ Р 57866–2023.

Определение содержания пустот в ПКМ проводили по ГОСТ Р 56679–2015.

Для определения структуры и дефектов композиционного материала использовали метод рентгенокомпьютерной томографии.

Плотность образцов, изготовленных разными методами резки, измеряли гидростатическим методом согласно ГОСТ 15139–69.

Для проведения испытаний физико-механических свойств ПКМ использовали высокоточную разрывную машину, подходящую по требованиям ГОСТ 28840–90, с максимальным усилием 5 кН и подвижной верхней траверсой. Образцы испытывали при комнатной температуре в интервале 22–24 °С и относительной влажности 40–45 % со скоростью перемещения траверсы 1,3 мм/с.

Результаты и обсуждение

Физико-механические испытания

Методом автоклавного формования изготовлено пять плит углепластика, далее определена толщина монослоя и плотность каждой плиты расчетным методом (табл. 1).

После изготовления образцов различными методами резки исследованы их плотность и определено содержание пустот, проведены испытания на статический изгиб. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Параметры* отформованных плит ПКМ
на основе препрега углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200**

Толщина монослоя, мм	Плотность, г/см ³
<u>0,180–0,187</u> 0,185	<u>1,56–1,59</u> 1,58
<u>0,183–0,188</u> 0,184	<u>1,57–1,59</u> 1,58
<u>0,181–0,188</u> 0,185	<u>1,57–1,58</u> 1,57
<u>0,182–0,186</u> 0,184	<u>1,58–1,59</u> 1,58
<u>0,181–0,186</u> 0,185	<u>1,57–1,59</u> 1,58

* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 2

**Результаты определения физико-механических свойств* углепластика марки
ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при статическом изгибе**

Метод обработки	σ , МПа	E , ГПа	Плотность, г/см ³	Содержание пустот, %
Резка алмазным диском без водяного охлаждения	<u>1100–1260</u> 1157	<u>53–56</u> 55	<u>1,56–1,59</u> 1,58	<u>0,02–2,08</u> 0,75
Резка алмазным диском с водяным охлаждением	<u>1060–1340</u> 1218	<u>53–56</u> 55	<u>1,57–1,59</u> 1,58	<u>0,22–1,46</u> 0,67
Гидроабразивная резка	<u>1010–1080</u> 1050	<u>49–51</u> 50	<u>1,57–1,58</u> 1,57	<u>1,11–1,65</u> 1,43
Резка на фрезеровочном станке	<u>1020–1260</u> 1034	<u>51–54</u> 52	<u>1,58–1,59</u> 1,58	<u>0,61–1,18</u> 0,89
Лазерная резка	<u>750–1070</u> 874	<u>56–59</u> 57	<u>1,50–1,54</u> 1,52	<u>3,73–5,82</u> 4,52

* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

По полученным данным построены диаграммы, представленные на рис. 8 и 9.

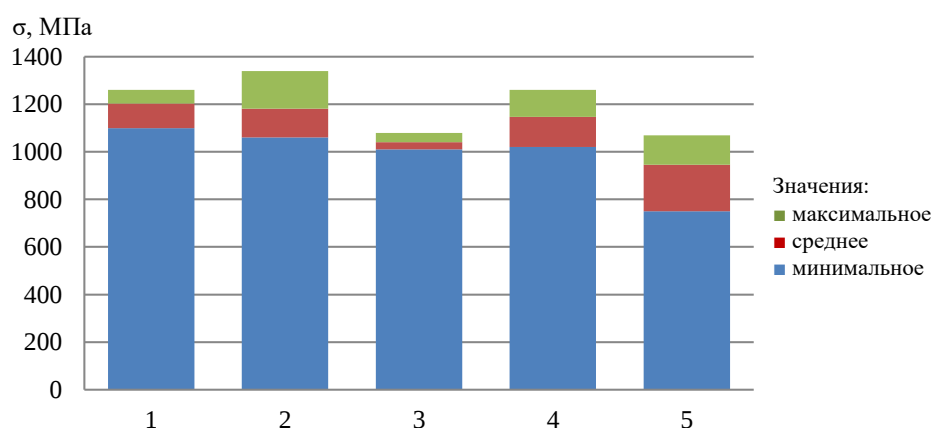


Рис. 8. Диаграмма прочности при статическом изгибе углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в зависимости от вида резки образцов: 1 – резка алмазным диском без водяного охлаждения; 2 – резка алмазным диском с водяным охлаждением; 3 – гидроабразивная резка; 4 – резка на фрезеровочном станке; 5 – лазерная резка

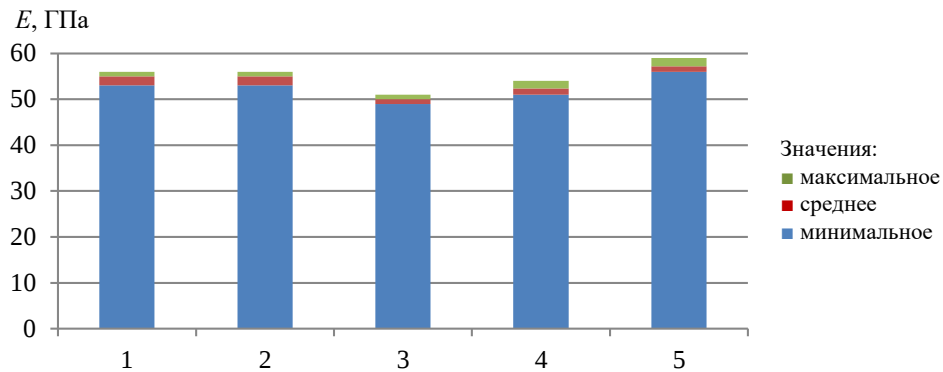


Рис. 9. Диаграмма модуля упругости при статическом изгибе углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в зависимости от вида резки образцов: 1 – резка алмазным диском без водяного охлаждения; 2 – резка алмазным диском с водяным охлаждением; 3 – гидроабразивная резка; 4 – резка на фрезеровочном станке; 5 – лазерная резка

По итогам испытаний ПКМ на статический изгиб можно констатировать, что наименьшей прочностью обладают образцы, изготовленные с помощью лазерной резки, при этом видно, что модуль упругости образца несколько возрастает. Потерю прочности углепластика можно объяснить нарушением целостности полимерной матрицы в зоне реза и потерей адгезионного взаимодействия полимерного связующего с углеродным наполнителем. Возможно, нарушение целостности полимерной матрицы приводит к увеличению в структуре материала пустот и в результате к уменьшению плотности образца углепластика. Однако следует отметить, что образцы, полученные с помощью лазерного станка, имеют преимущество в том, что точность резки находится в пределах $\pm 0,1$ мм.

Максимальной прочностью при статичном изгибе обладают образцы, нарезанные с помощью алмазного диска с водяным охлаждением. Данное явление связано с тем, что материал в процессе резки не перегревается. В этом случае низкая теплопроводность материала нивелируется с помощью водяного охлаждения, при этом кромка образцов не травмируется и не деформируется. Рассмотренный метод заслуживает особого внимания, если необходимо получить образец без снижения физико-механических свойств во время механической обработки.

Согласно данным, представленным на рис. 8, образцы, нарезанные с помощью фрезы и методом гидроабразивной резки, имеют почти одинаковые средние показатели прочности. Можно предположить, что это связано с тем, что в процессе резки материала создаются вибрационные нагрузки. Однако, как отмечено в статьях [10, 16], в виду гидроудара о поверхность плиты ПКМ способен расслаиваться, при этом вода попадает в микротрещины, что приводит к снижению значений модуля упругости материала по сравнению со значениями, полученными после других методов резки (рис. 9).

Как можно заметить (рис. 8), образцы, нарезанные с помощью алмазного диска без водяного охлаждения, имеют показатели прочности при статическом изгибе, близкие к аналогичным значениям при резке с водяным охлаждением. Этот метод очень сильно зависит от человеческого фактора, так как на резку образцов может повлиять скорость подачи ПКМ на алмазный диск и выставление корректных размеров для резки. Диск, не имеющий водяного охлаждения, способен быстро изнашиваться и перегреваться в процессе резки изделий. Следует отметить, что в данном случае происходит нагрев как алмазно-металлического диска, так и ПКМ, однако в отличие от резки с водяным охлаждением и метода гидроабразивной резки исключено попадание воды в поры.

Исследование поверхности углепластика с помощью оптического микроскопа

Для оценки влияния методов резки на структуру материала и поверхность торцевой части образца проведены исследования с помощью оптического микроскопа. На рис. 10 представлены фотографии поверхностей торцевой части образцов из углепластика, изготовленных разными методами резки.

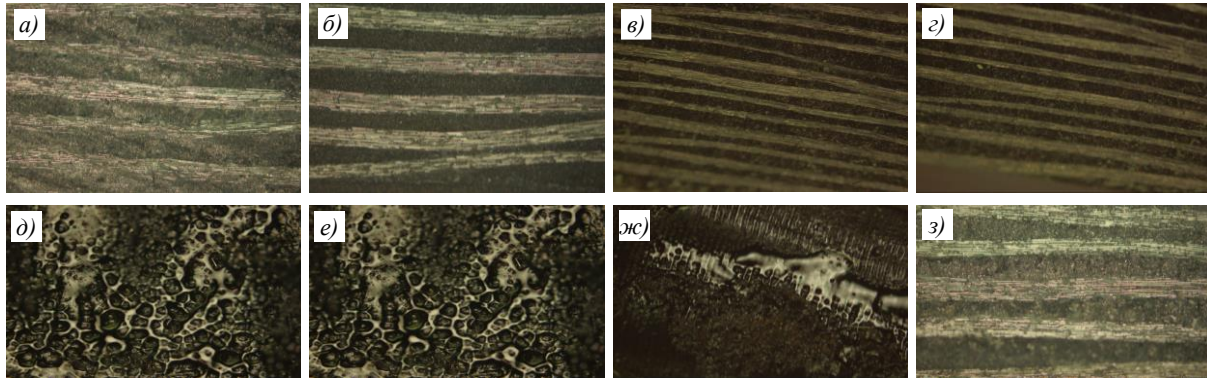


Рис. 10. Изображение поверхностей торцевой части образцов из углепластика, изготовленных разными методами резки: *a* – резка алмазным кругом без водяного охлаждения ($\times 100$); *b* – резка алмазным кругом с водяным охлаждением ($\times 100$); *в, г* – гидроабразивная резка ($\times 50$); *д–ж* – лазерная резка ($\times 100$); *з* – резка на фрезеровочном станке ($\times 100$)

Видно (рис. 10, *д–ж*), что лазерная резка углепластика сопровождается расплавом и вспениванием полимерной матрицы из-за высоких температур нагрева. На поверхности торцевой части образца ПКМ появляются ярко выраженные наплывы с мелкими пузырями.

Следует отметить, что образцы, нарезанные с помощью гидроабразивной резки, имеют на поверхности небольшие частицы абразива, которые можно заметить с помощью оптического микроскопа (рис. 10, *в, г*).

Резка на фрезеровочном станке сопровождается заусенцами и частичным краевым разрушением волокон в ПКМ.

Исследование структуры методом рентгенокомпьютерной томографии

С помощью этого метода исследована глубина дефектной зоны, которая образуется в результате различных методов резки образцов. На рис. 11 представлено трехмерное изображение образцов углепластика с плоскостями сканирования.

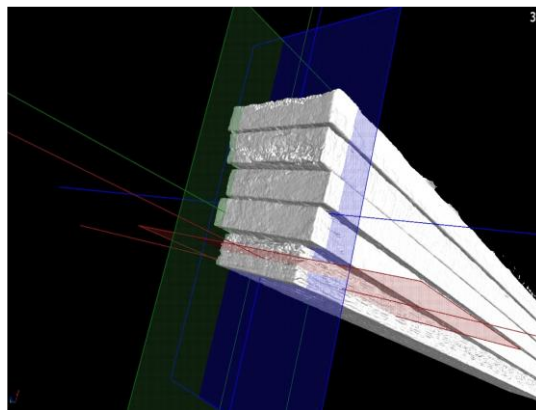


Рис. 11. 3D-изображение образцов ПКМ, нарезанных разными методами резки

На рис. 12 представлены фотографии образцов, которые исследовали методом рентгенокомпьютерной томографии по глубине сканирования.

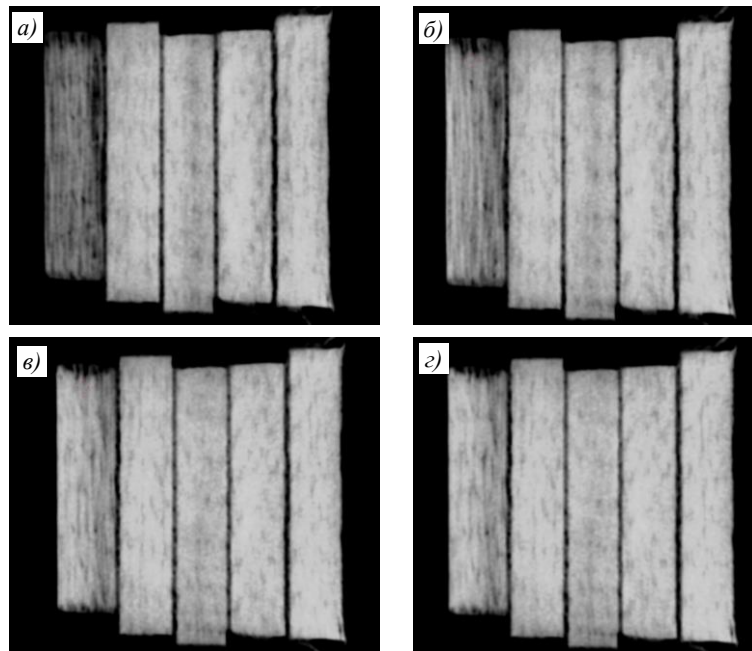


Рис. 12. Рентгенокомпьютерная томография образцов из углепластика (вид с торца), полученных разными методами резки на глубине 0,2 (а), 0,4 (б), 0,6 (в) и 1,1 мм (з), где слева направо образцы, изготовленные методами лазерной резки, гидроабразивной резки, механической резки алмазным кругом с водяным охлаждением, механической резки алмазным кругом без водяного охлаждения и резки на фрезеровочном станке

Видно, что образцы, изготовленные методом лазерной резки, имеют в своей структуре поры, которые образовались в результате выхода расплава полимерной матрицы на поверхность торца углепластика. Это связано с тем, что в процессе разрезания ПКМ связующее перегревается. Глубина пор в структуре ПКМ достигает величины 1,1 мм с торца изделия. В результате перегрева может происходить локальное нарушение адгезии между слоями, что оказывает влияние на прочностные показатели по сравнению с другими методами обработки. Это в свою очередь делает композиционный материал непригодным для эксплуатации. Следует отметить, что данный метод позволяет получить изделие с точными геометрическими параметрами, однако в случае перегрева ухудшаются механические показатели. По сравнению с другими методами применение лазерной резки требует более тщательного выбора параметров процесса воздействия на материал.

Следует обратить внимание на образец, который изготовлен на фрезеровочном станке. Видно, что изготовленный образец имеет заусенцы, так как при данном методе фреза распиливает ПКМ с помощью вращательного движения перпендикулярно плите.

Заключения

С применением пяти различных методов резки ПКМ получены элементарные образцы для проведения физико-механических испытаний на статический изгиб. По результатам этих испытаний сделан вывод о том, что при механической обработке алмазным кругом с водяным охлаждением прочность образцов имеет наибольшее значение. В данном случае поверхность реза гладкая, без сколов и дефектов, являющихся концентраторами напряжений.

На образцах, изготовленных методом фрезеровки и гидроабразивной резки, получены близкие по уровню средние значения прочности. При обоих методах резки материала создаются вибрационные нагрузки, что может приводить к образованию микротрещин и снижению прочности по сравнению со значениями, полученными на образцах, изготовленных при механической обработке алмазным кругом с водяным охлаждением.

Образцы, полученные методом лазерной резки, имеют наименьшие прочностные показатели, так как происходит нарушение целостности термореактивной матрицы, что в свою очередь приводит к образованию дефектов и снижает механические свойства образца. На поверхности торцевой части образца ПКМ появляются ярко выраженные наплывы полимерной матрицы с мелкими пузырями. Глубина дефектной зоны, образующейся в результате выхода расплава полимерной матрицы на поверхность торца, составляет до 1,1 мм.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доцентам МГТУ им. Н.Э. Баумана М.А. Мельниковой и А.А. Холопову, а также сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – резчику стекловолоконистых и стеклопластиковых материалов 3 разряда В.Н. Сизых, технику 2 категории А.А. Смолдыреву, механику С.Н. Лапину, участвовавшим в подготовке образцов к испытаниям.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. № 4 (71). С. 28–29.
2. Рудской А.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.
3. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.
4. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.
5. Кудрицкий В.Г. Композиционные материалы для узлов трения космического назначения // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8. № 3. С. 82–88.
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Лурье С.А., Миронов Ю.М., Нелюб В.А. и др. Моделирование зависимостей физико-механических характеристик от параметров микро- и наноструктуры полимерных композиционных материалов // Наука и образование. 2012. № 6. С. 4. DOI: 10.7463/0612.0431339.
8. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
9. Слепцов В.В. Методы механической обработки деталей машин, изготовленных из полимерных композиционных материалов (обзор) // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 80–83.
10. Малышева Г.В., Гузева, Т.А., Федоров Б.Б. Особенности гидроабразивной обработки стеклопластиков // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 9. С. 66–70.
11. Юдина Е.В. Современные технологии повышения эффективности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов, используемых в ракетно-космической технике // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 22. С. 323–332.
12. Голованов Д.С. Исследование влияния гидроабразивной обработки на детали из полимерно-композиционных материалов // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. 2023. № 1 (64). С. 92–98.

13. Голованов Д.С., Митин Р.А., Толкачев А.В. Влияние формообразующей гидроабразивной обработки на комбинированные материалы: полимерно-композиционный материал – титановый сплав // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. 2023. № 4 (67). С. 45–48.
14. Болотников И.С., Косенко Е.А. Способы и технологические особенности резки полимерных композиционных материалов (обзор) // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (23–25 сент. 2021 г., г. Белгород). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 19–25.
15. Верченко А.В., Курская И.А., Чигринцев Е.Г. Оптимизация процесса гидроабразивной резки заготовок из авиационных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 212–229.
16. Голубева К.Р., Носков А.И. Технологии обработки материалов на основе стеклопластиков // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 6 (120). С. 24–28. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-24-28.
17. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
18. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.
19. Дышенко В.С., Донецкий К.И., Минабаев М.И., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Ширяев В.В. Способы механической и электроэрозионной обработки полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
20. Хрульков И.А., Гуляев И.Н., Мишкин С.И. Особенности резки полимерных композиционных материалов алмазными кругами (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
21. Грищенко Т.А., Мелюхов Н.И., Любушкин В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2017. № 2 (31). С. 49–55. DOI: 10.5281/zenodo.808901.
22. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е. Современные методы механической обработки деталей из высокопрочных композиционных материалов для авиационной и ракетно-космической техники // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2015. С. 14–20.
23. Титов С.А., Рыжова Т.Б., Вермель В.Д. и др. Оценка методом акустической микроскопии повреждений ПКМ при механической обработке (фрезеровании, сверлении) // Материалы V отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов «КИМИЛА-2023» (17–18 окт. 2023 г., г. Жуковский). Жуковский: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. С. 292–299.
24. Кожевников С.И., Макаров В.Ф. Теоретические исследования влияния траектории фрезерования формообразующих поверхностей на износостойкость оснастки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2018. № 6. С. 117–120.
25. Дударев А.С., Алексутин А.С. Проблемы моделирования процесса фрезерования полимерных композиционных материалов // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: Материалы V Междунар. науч.-производств. конф., приуроченной ко Дню Российской науки (06–07 фев. 2020 г., г. Ульяновск). Ульяновск: УГТУ, 2020. С. 48–56.
26. Половнев Д.И., Баурова Н.И. Выбор методов механической обработки полимерных композиционных материалов, используемых при производстве и ремонте машин // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 29. С. 77–80.
27. Слепцов В.В. Оценка влияния технологии обработки на качество отверстий в деталях машин из полимерных композиционных материалов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2022. № 36. С. 113–116.

28. Гераськина М.Е., Казакова Т.Ю., Непомнящий Ю.Г. и др. Способы резки криволинейной поверхности рефлектора, изготовленного методом RTM-технологии // Решетневские чтения: материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (09–11 нояб. 2022 г., г. Красноярск). Красноярск: СибГУ науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2022. Ч. 1. С. 20–23.
29. Лобанов Д.В., Данилов П.Г., Владимирова Н.А., Григорьев А.Н. Разработка экспериментального стенда для исследования процесса обработки неметаллических композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 87–98.
30. Дударев А.С., Нечаева Е.В. Расчет теплонапряженности процесса резания твердосплавным инструментом полимерных композиционных материалов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 152–156. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029.
31. Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2021. Vol. 25. No. 3. P. 290–299. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
32. Усачева А.О., Гопанцов Д.Н., Вакулин М.С., Казаков И.С. Влияние геометрических параметров концевых фрез на качество поверхности при высокоскоростной обработке углепластиков // Технологии и техника: пути инновационного развития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (09 июня 2023 г., г. Воронеж). Воронеж: ВГТУ, 2023. С. 517–520.
33. Минибаев М.И., Усачева М.Н., Дыщенко В.С., Гончаров В.А. Приспособление и инструмент для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов на станке с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.
34. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
35. Носков А.И., Гильмутдинов А.Х., Асадуллина А.Р. Особенности лазерной резки углеродных полимерных композиционных материалов // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 155–164.
36. Яресьюк С.И., Балакиров С.Н. Моделирование композиционного материала для лазерной размерной обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 3 (250). С. 46–50. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-46-50.
37. Eltawahni H.A., Olabi A.G., Basmage O.M., Benyounis K.Y. CO₂ Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020. Vol. 1. P. 145–159.
38. Ablyaz T.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools // Materials. 2021. Vol. 14. No. 20. DOI: 10.3390/ma14206105.
39. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials // Micromachines. 2021. Vol. 12. No. 5. DOI: 10.3390/mi12050571.
40. Hsissou R., Benkhaya S., Elharfi A. et al. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5% NaCl solution: Experimental and computational approaches // Chemical Data Collections. 2021. Vol. 31. P. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
41. Hsissou R., Bekhta A., Rafik M. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites // Heliyon. 2020. Vol. 6. No. 6. P. e187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
42. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings // Polymer Testing. 2020. Vol. 85. P. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
43. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.

44. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4 (71), pp. 28–29.
2. Rudskoy A.I. Technological heredity in the production and operation of structural materials. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 2, pp. 2–10.
3. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-flammable polyimide glass-fiber laminates for products of aviation and rocket technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
4. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Study of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
5. Kudritsky V.G. Composite materials for friction units for space applications. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 82–88.
6. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 720 p.
7. Lurye S.A., Mironov Yu.M., Nelyub V.A. et al. Modeling the dependencies of physical and mechanical characteristics on the parameters of the micro- and nanostructure of polymer composite materials. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 6, p. 4. DOI: 10.7463/0612.0431339.
8. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
9. Sleptsov V.V. Methods of mechanical processing of machine parts made of polymer composite materials (review). *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2021, no. 34, pp. 80–83.
10. Malysheva G.V., Guzeva, T.A., Fedorov B.B. Features of waterjet processing of fiberglass. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii*, 2018, no. 9, pp. 66–70.
11. Yudina E.V. Modern technologies for improving the efficiency and quality of mechanical processing of polymer composite materials used in rocket and space technology. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye*, 2020, no. 22, pp. 323–332.
12. Golovanov D.S. Study of the influence of waterjet machining on parts made of polymer-composite materials. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2023, no. 1 (64), pp. 92–98.
13. Golovanov D.S., Mitin R.A., Tolkachev A.V. Influence of form-generating waterjet machining on combined materials: polymer-composite material – titanium alloy. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2023, no. 4 (67), pp. 45–48.
14. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A. Methods and technological features of cutting polymer composite materials (review). *Energy and resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: proc. Int. scientific-practical. conf. (September 23–25, 2021, Belgorod)*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2021, pp. 19–25.
15. Verchenko A.V., Kurskaya I.A., Chigrinets E.G. Optimization of the process of waterjet cutting of workpieces from aviation materials. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 212–229.
16. Golubeva K.R., Noskov A.I. Technologies for processing materials based on fiberglass. *Naukoymkie tekhnologii v mashinostroyenii*, 2021, no. 6 (120), pp. 24–28. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-24-28.
17. Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Girsh R.I. Technological features of machining of composite materials when manufacturing details of designs (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
18. Pripisnov Ya.A., Grishina O.I. Modern methods of mechanical processing of composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.

19. Dyshenko V.S., Donetskiy K.I., Minibaev M.I., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Shiryaev V.V. Methods of mechanical and electrical discharge machining of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
20. Khrulkov I.A., Gulyaev I.N., Mishkin S.I. Features of cutting polymer composite materials with diamond wheels (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
21. Grishchenko T.A., Melyukhov N.I., Lyubushkin V.O. Application of waterjet cutting in processing parts made of polymer composite materials. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta*, 2017, no. 2 (31), pp. 49–55. DOI: 10.5281/zenodo.808901.
22. Makarov V.F., Meshkas A.E. Modern methods of mechanical processing of parts made of high-strength composite materials for aviation and rocket and space technology. *Modern trends in metalworking technologies and designs of metalworking machines and components*: interuniv. sci. coll. Ufa: Ufa State Aviation Tech. Univ., 2015, pp. 14–20.
23. Titov S.A., Ryzhova T.B., Vermel V.D. et al. Assessment of PCM damage during mechanical processing (milling, drilling) using acoustic microscopy. *Proceedings of the V industry conf. on measuring equipment and metrology for aircraft research «KIMILA-2023»* (October 17–18, 2023, Zhukovsky). Zhukovsky: TsAGI named after prof. N.E. Zhukovsky, 2023, pp. 292–299.
24. Kozhevnikov S.I., Makarov V.F. Theoretical studies of the influence of the milling trajectory of form-forming surfaces on the wear resistance of tooling. *Avtomatizirovannoe proyektirovanie v mashinostroyenii*, 2018, no. 6, pp. 117–120.
25. Dudarev A.S., Aleksutin A.S. Problems of modeling the milling process of polymer composite materials. *Science, theory, practice of the aviation-industrial cluster of modern Russia*: Reports V Int. Sci.-prod. conf., dedicated to the Day of Russian Science (February 06–07, 2020, Ulyanovsk). Ulyanovsk: USTU, 2020, pp. 48–56.
26. Polovnev D.I., Baurova N.I. Selection of methods of mechanical processing of polymer composite materials used in the production and repair of machines. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2019, no. 29, pp. 77–80.
27. Sleptsov V.V. Assessment of the influence of processing technology on the quality of holes in machine parts made of polymer composite materials. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2022, no. 36, pp. 113–116.
28. Geraskina M.E., Kazakova T.Yu., Nepomnyashchiy Yu.G. et al. Methods of cutting a curved surface of a reflector manufactured using RTM technology. *Reshetnev readings: materials of the XXVI Int. scientific and practical. conf., dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev* (November 9–11, 2022, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk: SSU of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev, 2022, part 1, pp. 20–23.
29. Lobanov D.V., Danilov P.G., Vladimirova N.A., Grigoriev A.N. Development of an experimental stand for studying the process of processing non-metallic composite materials. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii*, 2021, vol. 8, no. 3-4, pp. 87–98.
30. Dudarev A.S., Nechaeva E.V. Calculation of thermal stress in the process of cutting polymer composite materials with a carbide tool. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2022, no. 3 (77), pp. 152–156. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029.
31. Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 290–299. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
32. Usacheva A.O., Gopantsov D.N., Vakulin M.S., Kazakov I.S. Influence of geometric parameters of end mills on surface quality during high-speed processing of carbon fiber reinforced plastics. *Technologies and equipment: ways of innovative development*: Reports Int. scientific and technical conf. (June 9, 2023, Voronezh). Voronezh: VSTU, 2023, pp. 517–520.
33. Minibaev M.I., Usacheva M.N., Dyshenko V.S., Goncharov V.A. A device and tool for making sample from polymer composite materials on a CNC machine (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.

34. Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of PCM on CNC machines (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
35. Noskov A.I., Gilmudinov A.Kh., Asadullina A.R. Features of laser cutting of carbon polymer composite materials. *Uspekhi prikladnoy fiziki*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 155–164.
36. Yaresko S.I., Balakirov S.N. Modeling of a composite material for laser dimensional processing. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (250), pp. 46–50. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-46-50.
37. Eltawahni H.A., Olabi A.G., Basmage O.M., Benyounis K.Y. CO₂ Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2020, vol. 1, pp. 145–159.
38. Ablyaz T.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20. DOI: 10.3390/ma14206105.
39. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 5. DOI: 10.3390/mi12050571.
40. Hsissou R., Benkhaya S., Elharfi A. et al. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5% NaCl solution: Experimental and computational approaches. *Chemical Data Collections*, 2021, vol. 31, p. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
41. Hsissou R., Bekhta A., Rafik M. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 6, p. e187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
42. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing*, 2020, vol. 85, p. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
43. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
44. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Иваньков Роман Русланович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Осияненко Наталья Викторовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ admin@viam.ru

Information about the authors

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

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ivan N. Gulyaev, Deputy Head of the Laboratory for Science, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.02.2025.
The article was submitted 09.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.02.2025.

Научная статья

УДК 666.9-129

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-64-72

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗВУКОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МАРКИ ВТИ-29

И.Э. Салимов¹, А.С. Беспалов¹, В.Г. Бабашов¹, А.А. Шаркалов¹

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

Аннотация. Исследованы основные эксплуатационные свойства теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29: плотность, коэффициент звукопоглощения, коэффициент теплопроводности, потеря массы после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С, сорбционная влажность после выдержки в течение 30 сут при температуре 22±5 °С и относительной влажности воздуха $\varphi = 98 \%$, время остаточного горения и длина прогорания. Установлено, что материал марки ВТИ-29 не уступает по свойствам материалам Microlite AA blankets и АТМ-1, а по значениям плотности, коэффициента звукопоглощения и сорбционной влажности превосходит их.

Ключевые слова: волокнистый теплозвукоизоляционный материал, плотность, коэффициент звукопоглощения, коэффициент теплопроводности, сорбционная влажность, распространение пламени

Для цитирования: Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г., Шаркалов А.А. Исследование эксплуатационных свойств теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-64-72.

Scientific article

THERMAL AND SOUND INSULATION MATERIAL OF THE VTI-29 BRAND: STUDY OF OPERATIONAL PROPERTIES

I.E. Salimov¹, A.S. Besspalov¹, V.G. Babashov¹, A.A. Sharkalov¹

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 main operational properties of the thermal and sound insulation material of the VTI-29 brand were studied, including: density, sound absorption coefficient, thermal conductivity coefficient, mass loss after 168 hours at a temperature of 70 °C, sorption humidity after 30 days at a temperature of 22±5 °C and relative air humidity $\varphi = 98 \%$, residual combustion time and burnout length. It was established that the thermal and sound insulation material of the VTI-29 brand is comparable to Microlite AA blankets and АТМ-1 materials, while in terms of density, sound absorption coefficient and sorption humidity, it surpasses them.

Keywords: fibrous thermal and sound insulating material, lighting, sound absorption coefficient, thermal conductivity coefficient, sorption humidity, flame propagation

For citation: Salimov I.E., Besspalov A.S., Babashov V.G., Sharkalov A.A. Thermal and sound insulation material of the VTI-29 brand: study of operational properties. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-64-72.

Введение

В основе создания человеком всего нового лежит определенная идея, но для ее реализации как минимум необходимы инструменты, материалы и специалисты, осуществляющие эту идею. Современные задачи по созданию антропогенных объектов требуют нестандартных решений, и зачастую только рабочих рук бывает недостаточно. В настоящее время большой объем производства, воспроизводимых результатов и высокое качество продукции обеспечиваются благодаря разработкам новейшего оборудования, роботизации и автоматизации систем управления производством, а в некоторых случаях – даже благодаря применению искусственного интеллекта. Развитие авиастроительной отрасли, связанное с ужесточением требований к безопасности и уровню комфорта пассажиров, а также к уменьшению удельного расхода топлива и повышению удельной тяги двигателей, диктует необходимость создания материалов с новым уровнем свойств. Перед материаловедом ставятся сложнейшие задачи по разработке технологий получения материалов, связанные с созданием оборудования для их производства.

Стремление к независимости от поставок импортных материалов, доля применения которых в современных отечественных грузопассажирских самолетах составляет до 70 %, должно способствовать не только импортозамещению, но и разработке конкурентоспособной продукции и технологий производства, чтобы в дальнейшем ориентироваться на внешний рынок для экспорта. В частности, существует потребность в разработке технологии получения теплозвукоизоляционного материала взамен материала марки Microlite AA blankets производства фирмы Jonson Marvell (США), поставки которого в РФ приостановлены, и отечественного аналога – материала марки АТМ-1, выпуск которого прекращен, причем восстановление оборудования и технологии для его производства, в том числе сырьевой базы, – крайне сложная задача, требующая больших капиталовложений и значительных человеческих ресурсов.

Поэтому необходимо создать отечественный гибкий теплозвукоизоляционный волокнистый материал низкой плотности, превосходящий по характеристикам материалы Microlite AA blankets и АТМ-1, и технологию его производства. Такой материал должен обладать низкими плотностью и теплопроводностью, высокими гидрофобными и звукопоглощающими свойствами, сохранять работоспособность в условиях циклических тепловых нагрузок и вибраций, а также отвечать современным требованиям по пожарной безопасности. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создан большой научный задел в области разработок волокнистых теплозвукоизоляционных материалов для летательных аппаратов [1–8] как на основе волокон растительного (марка АТИМХ – из хлопка) и животного (марка АТИМО – из оленьей шерсти) происхождения, так и на основе синтетических волокон (материалы марок ВТ4 и ВТ4С – из штапельного капронового волокна с полиамидным клеем в качестве связующего), а также упомянутого ранее материала марки АТМ-1 из стеклянных волокон и фенолформальдегидного связующего.

Основной задачей при разработке нового теплозвукоизоляционного материала являлось достижение оптимальных теплофизических и физико-механических свойств, что обеспечивалось определенными технологическими параметрами его получения, включая технологию производства связующего и разработку экспериментальной установки, на которой возможно достичь заданных параметров.

Разработанная экспериментальная установка по получению материала методом аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон позволяет достичь высокой пористости за счет хаотичного расположения волокон в объеме материала, что в свою очередь позволяет придать ему высокие теплоизоляционные и звукопоглощающие

свойства. Преимуществом данной установки является ее компактность, простота и возможность получения образцов широкой номенклатуры, так как в качестве исходного сырья могут использоваться волокна разных видов и различные связующие. Это дает возможность использовать устройство для получения различных видов теплоизоляционных материалов в зависимости от требований заказчика, а также в качестве лабораторной установки для сравнения свойств получаемых материалов. Например, при последовательной загрузке различных видов волокон (таких как стеклянные, минеральные, органические, растительные) можно получить слоистый материал, а при загрузке смеси различных волокон – комбинированный тип теплоизоляционного материала. Еще одно преимущество данной установки – возможность производства теплозвукоизоляционных материалов на любой площадке без совмещения с производством волокна [9].

Разработанное связующее марки ВС-74, помимо гибкости и упругости, придает пожаробезопасные свойства (небольшое выделение дыма, ограниченное распространение пламени при воздействии теплового потока и склонность к самозатуханию), а также гидрофобность теплозвукоизоляционному материалу [10–12] за счет введения дополнительных компонентов – гидрофобизаторов. Разработанному в соответствии с поставленной задачей материалу присвоена марка ВТИ-29.

В данной статье исследованы основные эксплуатационные свойства теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29, такие как плотность, коэффициент теплопроводности, потеря массы материала после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С, коэффициент звукопоглощения, сорбционная влажность после выдержки в течение 30 сут при температуре 22±5 °С и относительной влажности воздуха $\phi = 98 \%$, время остаточного горения и длина прогорания материала.

Материалы и методы

Объект исследования – образцы гибкого волокнистого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности марки ВТИ-29, которые получены аэрационным осаждением волокна (из стекла типа Е) с послойным нанесением связующего марки ВС-74. Нанесение связующего на стекловолокно при изготовлении образцов гибкого теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 проводили в экспериментальной установке для аэрационного осаждения стеклянных и керамических волокон [9]. Данная установка позволяет получать волокнистые теплозвукоизоляционные материалы низкой плотности (от 7 кг/м³). Достижение таких низких плотностей материала в данной установке возможно благодаря первоначальному разделению волокон в камере диспергирования с помощью сжатого воздуха с последующим осаждением их в камере волокноосаждения, оборудованной форсунками для нанесения связующего в процессе осаждения волокон.

Объектом исследования также являются образцы аналогов материала ВТИ-29 из теплозвукоизоляционных материалов Microlite AA blankets фирмы Jonson Marvell (США) и отечественного АТМ-1.

В данной работе определены следующие характеристики образцов гибкого волокнистого теплозвукоизоляционного материала низкой плотности марки ВТИ-29:

- плотность в соответствии с методикой из ГОСТ 17177–94;
- коэффициент теплопроводности в соответствии с методикой из ГОСТ 7076–99;
- потеря массы после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С в соответствии с методикой из ГОСТ 2678–94;
- коэффициент звукопоглощения в соответствии с методикой из ISO 10534-2 и ASTM E1050;

– сорбционная влажность после выдержки в течение 30 сут при температуре 22 ± 5 °С и относительной влажности воздуха $\phi = 98$ % в соответствии с методикой из ГОСТ 17177–94;

– время остаточного горения и длина прогорания в соответствии с АП-25, Приложение F, Часть VI.

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

Результаты и обсуждение

Результаты исследований плотности, коэффициентов звукопоглощения и теплопроводности, потери массы после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С, сорбционной влажности после выдержки в течение 30 сут при температуре 22 ± 5 °С и относительной влажности воздуха $\phi = 98$ % образцов из теплозвукоизоляционного материала низкой плотности марки ВТИ-29 представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные эксплуатационные характеристики образцов
теплозвукоизоляционного материала низкой плотности марки ВТИ-29
и их сравнение с материалами марок Microlite AA blankets и АТМ-1**

Характеристика	Значения характеристик для		
	материала ВТИ-29	зарубежного аналога – теплозвуко- изоляционного материала Microlite AA blankets фирмы Jonson Marvell (США)	отечественного аналога – теплозвуко- изоляционного материала АТМ-1
Плотность, кг/м ³	9,0±0,6	9,60±0,96	9,8±0,2
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,050±0,002 (при 100 °С)	0,051±0,002 (при 93 °С)	0,047±0,002 (при 100 °С)
Потеря массы при 70 °С и выдержке 168 ч, %	0,21±0,03	0,24±0,02	–
Коэффициент звукопоглощения	0,11–1,00 (в диапазоне частот 125–1600 Гц)*	0,35 (при 250 Гц), 0,75 (при 500 Гц), 0,87 (при 1000 Гц)**	0,05–1,0 (в диапазоне частот 125–1600 Гц)***
Сорбционная влажность (при 22 ± 5 °С, $\phi = 98$ %) за 30 сут, %	22,2±4,2	72,6±6,4	30,0±5,3
* Толщина образца 100 мм. ** Толщина образца 90 мм. *** Толщина образца 50 мм.			

Видно, что плотность теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 составляет 9,0 кг/м³ и в среднем имеет меньшее значение по сравнению с материалами марок Microlite AA blankets (плотность 9,6 кг/м³) и АТМ-1 (плотность 9,8 кг/м³). Меньшее среднее значение плотности материала марки ВТИ-29 достигается за счет равномерного распределения связующего в его объеме (рис. 1, а), которое обеспечивает трехмерную каркасную структуру, как и в материале Microlite AA blankets (рис. 1, б). Следует отметить, что в теплозвукоизоляционном материале АТМ-1 связующее нанесено крайне неравномерно, что наблюдается на фотографии, полученной с помощью оптической микроскопии (рис. 1, в).



Рис. 1. Оптическая микроскопия структуры материалов ВТИ-29 (а), Microlite AA blankets (б) и АТМ-1 (в)

Уменьшению плотности материала также способствует хаотичное расположение волокон в материале ВТИ-29 (рис. 2, а), в свою очередь материал Microlite AA blankets обладает слоистой структурой, что видно на микрофотографии, полученной с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 2, б).

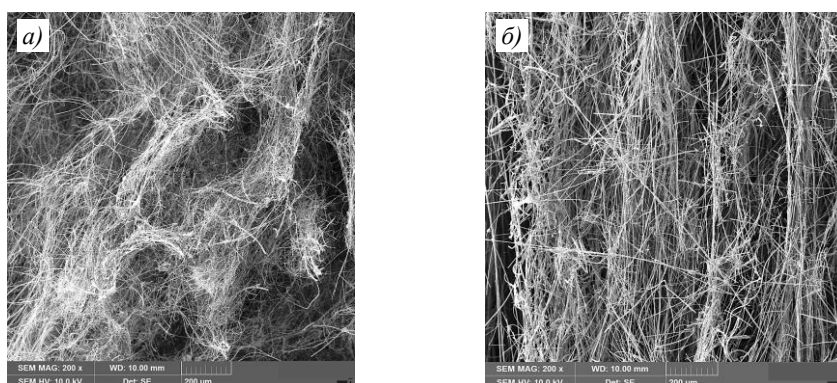


Рис. 2. Электронная микроскопия структуры материалов ВТИ-29 (а) и Microlite AA blankets (б)

Установлено, что коэффициент теплопроводности теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 составляет 0,050 Вт/(м·К) при температуре 100 °С и в пределах доверительного интервала находится на одном уровне со значениями для материалов марок Microlite AA blankets и АТМ-1, коэффициенты теплопроводности которых составляют соответственно: 0,051 Вт/(м·К) при 93 °С и 0,047 Вт/(м·К) при 100 °С.

В данной работе исследована потеря массы образцов теплозвукоизоляционных материалов марок ВТИ-29 и Microlite AA blankets с целью определения количества легколетучих компонентов, таких как формальдегид, ацетон и др. В результате исследований установлено, что потеря массы материала марки ВТИ-29 составляет 0,21 %, а для материала марки Microlite AA blankets эта характеристика равна 0,24 %, что свидетельствует об очень низкой токсичности данных теплозвукоизоляционных материалов.

С целью исследования гидрофобных свойств материалов марок ВТИ-29, Microlite AA blankets и АТМ-1 определена сорбционная влажность после выдержки образцов материалов в течение 30 сут при температуре 22 ± 5 °С и относительной влажности воздуха $\phi = 98$ %. Результаты исследований показывают, что материал марки ВТИ-29 обладает наименьшей сорбционной влажностью (22,2 %) по сравнению с аналогами. Следует отметить, что теплозвукоизоляционный материал марки ВТИ-29 более чем в 3 раза превосходит по этому показателю импортный аналог.

Результаты исследований коэффициента звукопоглощения при разных толщинах теплозвукоизоляционных материалов марок ВТИ-29 и АТМ-1 (рис. 3) в диапазоне частот от 60 до 1600 Гц показывают, что с увеличением толщины теплозвукоизоляционного

материала максимум коэффициента звукопоглощения смещается в область низких частот, что является типичным для волокнистых теплозвукоизоляционных материалов [13]. Видно, что при толщине материала 25 мм коэффициент звукопоглощения материала ВТИ-29 больше, чем у материала АТМ-1. Следует также отметить, что у материала ВТИ-29 при толщине 50 мм коэффициент звукопоглощения на частотах, превышающих 800 Гц, больше, чем у материала АТМ-1. В сравнении с импортным материалом марки Microlite AA blankets толщиной 90 мм материал марки ВТИ-29 обладает большим значением коэффициента звукопоглощения на частотах 500 и 1000 Гц уже при толщине 75 мм. Коэффициенты звукопоглощения для материала марки Microlite AA blankets на частотах 500 и 1000 Гц составляют 0,75 и 0,87 соответственно, а для материала марки ВТИ-29 соответственно 0,87 и 0,96, что видно из данных рис. 3 и табл. 1. На частоте 250 Гц коэффициент звукопоглощения материала марки Microlite AA blankets при толщине 90 мм составляет 0,35, а у материала марки ВТИ-29 при толщине 100 мм равен 0,7, что позволяет сделать предположение, что на частоте 250 Гц материал ВТИ-29 обладает звукоизоляционными свойствами не хуже, чем у материала Microlite AA blankets. С учетом вышеизложенного можно сделать вывод, что материал марки ВТИ-29 превосходит по звукоизоляционным свойствам как импортный, так и отечественный аналоги.

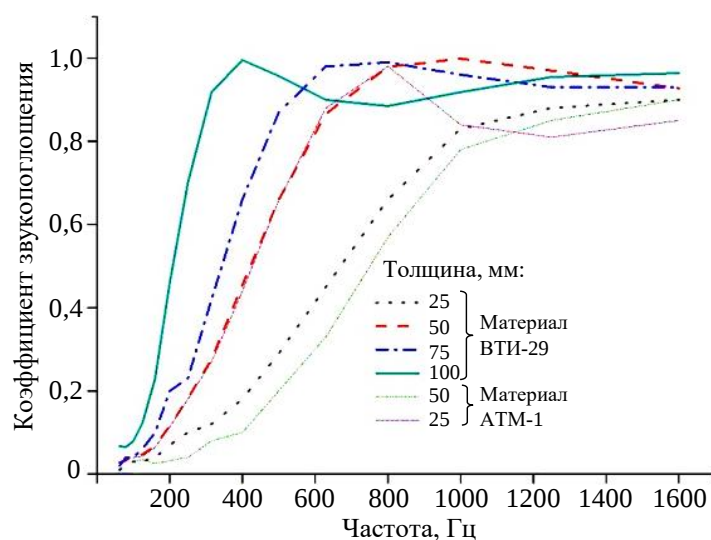


Рис. 3. Зависимость коэффициента звукопоглощения от частоты в теплозвукоизоляционных материалах марок ВТИ-29 и АТМ-1 при разных толщинах материалов

Одним из важнейших требований к авиационным теплозвукоизоляционным материалам является их пожаробезопасность [14, 15]. В табл. 2 представлены результаты испытаний на распространение пламени теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 в соответствии с АП-25, Приложение F, Часть VI.

Таблица 2

Результаты испытаний теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 на распространение пламени

Материал	Время остаточного горения, с	Длина прогорания, мм
ВТИ-29	0	15
	0	30
	0	25
Допустимые значения по АП-25, Приложение F, Часть VI	Не более 3	Не более 51

Видно, что материал марки ВТИ-29 полностью соответствует требованиям АП-25, Приложение F, Часть VI. В частности, время остаточного горения составляет 0 с, а длина прогорания не превышает 30 мм, что свидетельствует о пожаробезопасности материала марки ВТИ-29.

Заключения

Исследованы основные эксплуатационные свойства образцов теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29: плотность, коэффициенты звукопоглощения и теплопроводности, потеря массы после выдержки в течение 168 ч при температуре 70 °С, сорбционная влажность после выдержки в течение 30 сут при температуре 22±5 °С и относительной влажности воздуха $\phi = 98 \%$, время остаточного горения и длина прогорания.

В среднем плотность теплозвукоизоляционного материала ВТИ-29 (9,0 кг/м³) меньше, чем у зарубежного материала-аналога Microlite AA blankets с плотностью 9,6 кг/м³ и отечественного материала-аналога АТМ-1 с плотностью 9,8 кг/м³, что обеспечивается равномерностью нанесения связующего и хаотичным расположением волокон в объеме материала ВТИ-29.

Коэффициент теплопроводности теплозвукоизоляционного материала марки ВТИ-29 составляет 0,05 Вт/(м·К) при температуре 100 °С и находится на одном уровне со значениями аналогичного показателя для материалов марок Microlite AA blankets и АТМ-1.

Результаты исследований показывают, что материал марки ВТИ-29 обладает наименьшей сорбционной влажностью (22,2 %) по сравнению с импортным и отечественным аналогами. Кроме того, теплозвукоизоляционный материал ВТИ-29 более чем в 3 раза превосходит по этому показателю материал Microlite AA blankets.

По значению коэффициента звукопоглощения при частотах до 800 Гц материал ВТИ-29 находится приблизительно на одном уровне с материалами-аналогами Microlite AA blankets и АТМ-1, а при частотах, превышающих 800 Гц, – превосходит их.

Материал марки ВТИ-29 полностью соответствует требованиям АП-25, Приложение F, Часть VI и является пожаробезопасным.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Glass and Ceramics Based High-Temperature Composite Materials for use in Aviation Technology // *Glass and Ceramics*. 2012. Vol. 69. No. 3-4. P. 109–112.
3. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
4. Баринов Д.Я., Мараховский П.С., Зуев А.В. Математическое моделирование деструкции теплозащитного материала на основе стеклопластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 71–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-71-78.
5. Зуев А.В., Заричняк Ю.П., Баринов Д.Я., Краснов Л.Л. Исследование теплофизических свойств гибкого теплоизоляционного материала // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.

6. Оснос С.П. Применение материалов на основе базальтовых волокон в авиакосмической отрасли // Композитный мир. 2015. № 4 (61). С. 72–79.
7. Бабашов В.Г., Беспалов А.С., Истомина А.В., Варрик Н.М. Теплозвукоизоляционный материал, изготовленный с использованием растительного сырья // Новые огнеупоры. 2017. № 3. С. 173–178.
8. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S1. С. 3–9.
9. Устройство для получения нетканого теплоизоляционного материала: пат. 2817837 Рос. Федерация; заявл. 20.07.23; опубл. 22.04.24.
10. Бойнович Л.Б., Домантовский А.Г., Емельяненко А.М. и др. Противообледенительные свойства супергидрофобных покрытий на алюминии и нержавеющей стали // Известия Академии наук. Сер.: Химическая. 2013. № 2. С. 383–390.
11. Kondrashov E.K., Nefedov N.I., Vereninova N.P. et al. Modification of fluorocopolymer coatings by telomers to improve their hydrophobicity // Polymer Science. Series D. 2016. Vol. 9. No. 2. P. 212–218.
12. Антипов В.В., Салимов И.Э., Беспалов А.С., Бабашов В.Г. Исследование влияния состава связующего на плотность, физико-механические и гидрофобные свойства теплозвукоизоляционного материала // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.11.2024.). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-25-32.
13. Шашкеев К.А., Шульдешов Е.М., Попков О.В., Краев И.Д., Юрков Г.Ю. Пористые звукопоглощающие материалы (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2024.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6.
14. Орлов А.В., Чурсова Л.В., Гребенева Т.А., Панина Н.Н. Антипирены для создания трудногорючих и пожаробезопасных полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 1. С. 23–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-1-23-30.
15. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Аюпов Т.Р. Пожаробезопасность конструкционных органопластиков, армированных арамидными тканями // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S., Sevastyanov V.G. Glass and Ceramics Based High-Temperature Composite Materials for use in Aviation Technology. *Glass and Ceramics*, 2012, vol. 69, no. 3–4, p. 109–112.
3. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
4. Barinov D.Ya., Marakhovskij P.S., Zuev A.V. Mathematical modeling of destruction of fiberglass-based thermal-protection material. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 71–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-71-78.
5. Zuev A.V., Zarichnyak Yu.P., Barinov D.Ya., Krasnov L.L. Measurement of thermophysical properties of flexible thermal insulation. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 22, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-119-126.
6. Osnos S.P. Application of materials based on basalt fibers in the aerospace industry. *Kompozitnyy mir*, 2015, no. 4 (61), pp. 72–79.

7. Babashov V.G., Bepalov A.S., Istomin A.V., Varrik N.M. Heat and sound insulating material made using plant raw materials. *Novye ognepupory*, 2017, no. 3, pp. 173–178.
8. Kablov E.N. Materials for «Buran» spaceship – innovative solutions of formation of the sixth technological mode. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2013, no. S1, pp. 3–9.
9. *Device for producing non-woven thermal insulation material*: pat. 2817837 Rus. Federation; appl. 20.07.23; publ. 22.04.24.
10. Boynovich L.B., Domantovsky A.G., Emelyanenko A.M. et al. Anti-icing properties of superhydrophobic coatings on aluminum and stainless steel. *Izvestiya Akademii nauk. Ser.: Chemical*, 2013, no. 2, pp. 383–390.
11. Kondrashov E.K., Nefedov N.I., Vereninova N.P. et al. Modification of fluorocopolymer coatings by telomers to improve their hydrophobicity. *Polymer Science. Series D*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 212–218.
12. Antipov V.V., Salimov I.E., Bepalov A.S., Babashov V.G. Study of the influence of the composition of the binder on the density, physica-mechanical and hydrophobic properties of heat-sound insulation material. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 15, 2024.). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-25-32.
13. Shashkeev K.A., Shuldeshev E.M., Popkov O.V., Kraev I.D., Yurkov G.Yu. Porous sound-absorbing materials (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 6, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2024.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6.
14. Orlov A.V., Chursova L.V., Grebeneva T.A., Panina N.N. Flame retardants for creating flame retardant and fireproof polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2022, no. 1, pp. 23–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-1-23-30.
15. Kan A.Ch., Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Ayupov T.R. Fire safety of structural organic plastics reinforced with aramid fabrics. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.

Информация об авторах

Салимов Илья Эркинович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Бабашов Владимир Георгиевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шаркалов Александр Алексеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilya E. Salimov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Vladimir G. Babashov, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander A. Sharkalov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.02.2025.
The article was submitted 04.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.02.2025.

Научная статья

УДК 678.8:614.84

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЮЧЕСТИ, ДЫМООБРАЗОВАНИЯ И ТОКСИЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

А.И. Старков¹, К.Е. Куцевич¹, А.Ю. Исаев¹, С.Л. Барботько¹, А.А. Баранников¹

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

Аннотация. Проведена комплексная оценка горючести, дымообразования и токсичности углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ, стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП) и трехслойных сотовых конструкций на их основе требованиям авиационных норм. По результатам испытаний на горючесть установлено полное соответствие требованиям авиационных норм углепластика марки ВКУ-59, стеклопластика марки ВПС-68 и сотовых конструкций на их основе.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, клеевой препрег, клеевые соединения, горючесть, дымообразование, токсичность, трехслойные конструкции

Для цитирования: Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Барботько С.Л., Баранников А.А. Исследование горючести, дымообразования и токсичности в процессе горения полимерных композиционных материалов и трехслойных сотовых конструкций на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.

Scientific article

STUDY OF FLAMMABILITY, SMOKE FORMATION AND TOXICITY IN THE PROCESS OF COMBUSTION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS AND THREE-LAYER HONEYCOMB STRUCTURES BASED ON THEM

A.I. Starkov¹, K.E. Kutsevich¹, A.Yu. Isaev¹, S.L. Barbotko¹, A.A. Barannikov¹

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 complex estimation of combustibility of smoke formation and toxicity of carbon fiber-reinforced plastic of mark VKU-59 on the basis of adhesive prepreg of mark KMKU-6.80.UV and glass fiber-reinforced plastic of mark VPS-68 on the basis of adhesive prepreg of mark KMKS-6.80.T60(VMP), as well as three-layer honeycomb structures on their basis to the requirements of aviation norms has been carried out. According to the results of tests of carbon fiber-reinforced plastic of mark VKU-59, fiberglass plastic of mark VPS-68, and honeycomb structures on their basis for combustibility, full compliance with the requirements of aviation standards was established.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, fiberglass, adhesive prepreg, adhesive compounds, combustibility, smoke formation, toxicity, three-layer structures

For citation: Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Barbotko S.L., Barannikov A.A. Study of flammability, smoke formation and toxicity in the process of combustion of polymer composite materials and three-layer honeycomb structures based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-73-85.

Введение

В условиях импортозамещения, а также для достижения весовой эффективности, обусловленной заменой традиционных металлических материалов на современные, разработчики авиационной техники все чаще обращаются к полимерным композиционным материалам (ПКМ) с заданным уровнем прочностных свойств [1–4].

Помимо повышенных прочностных характеристик, для материалов, применяемых в интерьере воздушных судов и других транспортных средств, имеют значение дополнительные требования к пожарной безопасности в пределах рабочих температур. Эти требования особенно актуальны в связи с заменой в некоторых узлах авиационных изделий металлических компонентов на ПКМ, обеспечивающие снижение массы, но в то же время являющиеся горючими. При разработке нового поколения самолетов, в которых планируется увеличить долю ПКМ, необходимо решить задачу создания материалов с новым набором свойств, отвечающих жестким требованиям, включая пожаробезопасность (при использовании ПКМ в авиационном интерьере).

Одним из важнейших вопросов обеспечения пожаробезопасности является надежность экранирования зон с высокой вероятностью возникновения пожара (пожароопасных зон) от других элементов планера – пассажирских и багажно-грузовых отсеков.

Цель исследований – установление соответствия свойств углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 требованиям отечественных авиационных норм, представленных в НЛГ 25 и АП-25 (п. 25.853 (а) и п. 25.855 (d)), к горючести в соответствии с методом испытаний, изложенным в Части I (а) (i) Приложения F данных документов.

По результатам испытаний на углепластик ВКУ-59 оформлен паспорт № 1994, на стеклопластик марки ВПС-68 – паспорт № 1995. Организован серийный выпуск разработанных материалов на сертифицированном производстве в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Объектами исследования являются углепластик марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ (ТУ 1-595-11-1775–2018) и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП) (ТУ 1-595-11-1776–2018), разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Препреги представляют собой углеродный жгутовый наполнитель и стеклоткань, пропитанные эпоксидным клеевым связующим пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80 °С. Углепластик ВКУ-59 является аналогом углепластика HexPly M56/40%/193PW/AS4-3K (фирма Hexcel, США), стеклопластик ВПС-68 – аналогом стеклопластика HexPly M76/37%/7781 (фирма Hexcel, США).

Свойства углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевых препрегов исследовали на образцах, изготовленных методом автоклавного формования [5–19].

Согласно федеральным (государственным) авиационным нормам, все декоративно-отделочные и конструкционные материалы, используемые во внутренней

отделке пассажирских салонов и багажно-грузовых отсеков, должны соответствовать требованиям по ограничению горючести. В Российской Федерации в настоящее время действуют как международные Авиационные правила, установленные Международным авиационным комитетом, так и Нормы летной годности, введенные Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация). Тексты этих документов и предъявляемые в них требования практически идентичны.

Требования в части пожарной безопасности зависят как от типа (вертолеты, самолеты, аэростаты) и категории (легкая, транспортная, очень легкая, беспилотная) авиационной техники, так и от функционального назначения материала. Наиболее жесткие требования в части пожарной безопасности АП-25 и НЛГ 25 предъявляют к материалам, используемым в пассажирских салонах больших (транспортных) самолетов. Кроме того, авиастроительные корпорации вправе устанавливать свои более жесткие или дополнительные требования к материалам, применяемым в конструкциях их авиационной техники.

Для определения возможности допуска к применению в авиастроении исследованы характеристики пожарной опасности указанных материалов: горючесть, дымообразование и токсичность на основе измерения концентраций газов, выделяющихся при термодеструкции.

Горючесть

В соответствии с требованиями авиационных норм (п. 25.853 (a) параграфа 25.853 «Внутренняя отделка кабин» и п. 25.855 (d) параграфа 25.855 «Грузовые и багажные отсеки»), все используемые материалы должны удовлетворять применимым к ним критериям испытаний, предписанным в Части I Приложения F. Соответствующие методы испытаний приведены также в ГОСТ Р 57924–2017. Перечисленные документы предусматривают несколько методов испытаний. Для конструкционных материалов в зависимости от их функционального назначения могут использоваться вертикальный метод испытания с экспозицией пламенем горелки в течение 60 с (п. (a) (1) (i) Части I) и 12 с (п. (a) (1) (ii) Части I), а также метод испытаний под углом 45 градусов к горизонту (пп. (a) (2) (ii) и (iii) Части I). В данной работе выполнены исследования с использованием вертикального метода испытаний с экспозицией пламенем горелки в течение 60 с.

Сущность метода заключается в воздействии малокалорийного источника воспламенения (пламя лабораторной газовой горелки) на нижнюю часть вертикально установленного образца в течение заданного времени. Способность образца к самостоятельному прекращению горения определяется по длине прогорания, времени остаточного (самостоятельного) горения после удаления источника воспламенения, наличию и продолжительности горения падающих капель. Материалы считаются соответствующими требованиям авиационных норм, если при экспозиции образца пламенем горелки в течение 60 с продолжительность остаточного горения составляет ≤ 15 с, длина прогорания ≤ 152 мм (6 дюймов), продолжительность горения капель ≤ 3 с.

Дымообразование

Требования по ограничению дымообразования (оптической плотности дыма) в современных федеральных авиационных нормах предъявляются только к панелям потолка, стен и перегородок пассажирской кабины (п. 25.853 (d)). В соответствии с указанным пунктом, испытания должны проводиться по методике, приведенной в Части V Приложения F, т. е. по ГОСТ 24632–81. Регламентированной характеристикой,

определяющей допустимость применения материалов, является величина оптической плотности дыма, достигаемая в течение первых 4 мин испытания (не более 200 ед.). В зарубежных федеральных авиационных нормах требуется проведение испытаний только в режиме горения, в отечественных нормах (АП-25 и НЛГ 25) режим испытания не указан. Таким образом, испытания требуется проводить в двух режимах – горение и пиролиз.

Этот же п. 25.853 (d) авиационных норм требует определения тепловыделения при горении по методике, изложенной в Части IV Приложения F. При этом испытаниям как на дымообразование, так и на тепловыделение должны подвергаться образцы конструкционных панелей вместе с нанесенным декоративным покрытием.

В соответствии с требованиями федеральных авиационных норм, как отечественных, так и зарубежных, дымообразование панелей пола, а также панелей багажных и грузовых отсеков не регламентируется. Но авиастроительные корпорации вправе устанавливать свои дополнительные требования. При этом может регламентироваться максимально допустимая оптическая плотность дыма не только через 4 мин, но также и через 90 с от начала испытания.

Дымообразование образцов углепластика и стеклопластика на соответствие требованиям авиационных норм (Приложение F, Часть V) оценивали согласно ГОСТ 24632–81 (зарубежные аналоги – ASTM E662–2021 и ASTM F814–2019). Сущность метода испытаний заключается в воздействии в герметичной камере на вертикально установленный образец теплового потока заданной интенсивности (25 кВт/м^2) и пламени многорожковой газовой горелки (режим испытания – горение) или только теплового потока (режим испытания – пиролиз или тление). Через образующиеся парогазовые продукты термической деструкции и горения проходит световой луч заданной интенсивности, по степени ослабления которой судят об оптической плотности дыма в каждый текущий момент времени.

Токсичность продуктов горения

Ни в отечественных, ни в зарубежных федеральных авиационных нормах ни к каким материалам не предъявляют требований по ограничению токсичности продуктов горения. Но зарубежные авиастроительные корпорации, например Boeing, Airbus, Bombardier, устанавливают такие требования к материалам, применяемым в конструкциях их самолетов. При этом в зависимости от корпорации требования различаются.

Существуют различные методы определения токсичности продуктов горения, наибольшее распространение получили два варианта – по смертности лабораторных животных и на основе измерения концентраций некоторых (основных) выделяющихся газов. Наиболее просто реализуется метод измерения концентраций газов, образующихся в дымовой камере в процессе определения оптической плотности дыма с помощью одноразовых газоанализаторных трубок. Именно такой метод используют в корпорациях Boeing, Airbus, Bombardier. Этот метод применен в данном исследовании.

Результаты и обсуждение

В соответствии с утвержденной нормативной документацией на материалы, по разработанному режиму отверждения методом автоклавного формования изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68. Полученные из отформованных плит образцы испытаны на пожаробезопасность.

Результаты испытаний образцов на горючесть в соответствии с требованиями авиационных норм приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть в вертикальном положении
при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с**

Материал	Толщина образца, мм	Продолжительность остаточного горения (средняя), с	Длина прогорания (средняя), мм	Продолжительность горения капель, с
ВКУ-59	1,11	0	56,3	0
	2,10	2,3	59,0	
	3,99	1,0	39,0	
ВПС-68	1,23	0	72,0	
	2,28	1,6	53,3	
	4,18	0,6	46,3	
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть I (a) (1) (i), не более		15	152	3

Как видно из табл. 1, углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 соответствуют требованиям авиационных норм по горючести.

Одним из видов пожарной опасности, присущих полимерным материалам, в том числе ПКМ, является способность выделять дым. Мелкодисперсные конденсированные частицы, образующиеся в процессе термоокислительной деструкции, приводят к снижению видимости, что затрудняет ориентацию в пространстве и способствует возникновению паники. Кроме того, такие частицы адсорбируют (абсорбируют) токсичные соединения, попадание которых в дыхательные пути человека наносит вред его здоровью и может привести к преждевременной смерти.

Поэтому определение данного показателя пожарной опасности для полимерных материалов должно быть неотъемлемой частью исследований при проектировании конструкций (деталей) из ПКМ, которые планируется применять во внутренней части самолета.

Как отмечено ранее, ПКМ, предназначенные для использования в самолете в качестве отделки стен, потолка, перегородок пассажирской кабины, должны соответствовать требованиям авиационных норм по дымообразованию, при этом удельная оптическая плотность дыма за 4 мин не должна превышать 200 ед. Однако это требование, изложенное в федеральных авиационных нормах, относится только к панелям стен и потолка в месте постоянного пребывания пассажиров (пассажирская кабина с количеством мест не менее 20). Данные требования не относятся к местам временного пребывания (туалеты, коридоры, кухни), кабине пилотов и багажно-грузовому отсеку. Высокая дымообразующая способность материалов, из которых изготовлены панели багажно-грузовых отсеков, может способствовать более быстрому срабатыванию датчиков дыма и оперативному информированию экипажа о возникновении пожара в местах, где обычно во время полета отсутствуют люди.

Эти требования федеральных авиационных норм не относятся к материалам другого функционального назначения, например к панелям пола. Это объясняется тем, что панели пола расположены в нижней части кабины. При проникновении открытого пламени в пассажирскую кабину в случае летного происшествия тепловой поток, падающий на нижнюю часть кабины, будет значительно меньше, чем тепловой поток, попадающий на стены и потолок. Кроме того, панели пола закрыты декоративным покрытием (линолеум, ковер, антискользящее покрытие) и в основном экранированы от пламени другими предметами (кресла). Поэтому целесообразнее определять

дымообразующую способность не панелей пола, а именно декоративных покрытий. Именно такой подход реализован в авиационных нормах корпораций.

Тем не менее для получения информации о потенциальной опасности углепластика ВКУ-59 и стеклопластика ВПС-68 проведены исследования по определению дымообразующей способности. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68
на основе клеевого связующего на дымообразующую способность**

на основе классификации связующего на дымообразующую способность					
Материал	Толщина образца, мм	Режим испытания	Удельная оптическая плотность дыма		
			D_2	D_4	$D_{\max}$
ВКУ-59	0,41	Горение	125	129	130
		Пиролиз	113	172	190
	0,83	Горение	250	257	258
		Пиролиз	238	264	281
	1,10	Горение	333	343	344
		Пиролиз	208	312	319
	2,07	Горение	373	403	405
		Пиролиз	81	287	303
	4,39	Горение	238	626	655
		Пиролиз	3	166	445
ВПС-68	0,38	Горение	64	93	98
		Пиролиз	74	96	103
	0,79	Горение	147	180	182
		Пиролиз	130	162	162
	1,18	Горение	438	450	451
		Пиролиз	262	343	345
	2,22	Горение	609	639	639
		Пиролиз	138	461	473
	4,20	Горение	138	461	473
		Пиролиз	338	818	639
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть V (b), не более			—	200	—

Углепластик марки ВКУ-59 толщиной 0,41 мм и стеклопластик марки ВПС-68 толщиной до 0,79 мм, изготовленные на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6, имеют оптическую плотность дыма меньше предельно допустимого значения (200 ед.). Испытанные образцы ПКМ на основе этого связующего больших толщин имеют оптическую плотность дыма >200 ед.

Панели пола занимают значительную часть самолета. В магистральных самолетах с количеством мест от 200 их площадь превышает 100 м², с количеством мест от 24 до 80 составляет 14–45 м². Применение ПКМ при изготовлении панелей пола воздушных судов позволяет уменьшить массу изделий и значительно увеличить их долговечность, при этом сохраняя прочность и жесткость. Формованием (методом прессования) изготовлены образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ и стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП). Далее представлены результаты исследований пожаробезопасности конструктивных элементов (трехслойные сотовые панели), изготовленных с обшивками из указанных ПКМ.

В табл. 3 приведены характеристики горючести трехслойных сотовых панелей.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть

Материал	Толщина образца, мм	Продолжи- тельность экспозиции пламенем горелки, с	Продол- жительность остаточного горения, с	Длина прогорания, мм	Продолжи- тельность горения капель, с
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,28	60	0	9	0
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,06			84	
Допустимые значения по НЛГ 25, Приложение F, Часть I (a) (1) (i), не более			15	152	3

Установлено, что образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых препрегов угле- и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 по характеристикам горючести отвечают требованиям отечественных и зарубежных федеральных авиационных норм и корпоративных стандартов (Приложение F, Часть I (a) (1) (i)).

Проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола на соответствие требованиям АП-25 (Приложение F, Часть V) по дымообразующей способности с целью определения возможности их применения во внутренней части самолета (табл. 4).

Таблица 4

Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на дымообразующую способность

Материал	Толщина образца, мм	Режим испытания	Показатель удельной оптической плотности дыма		
			D_2	D_4	D_{max}
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,36	Горение	159	199	205
	10,38	Пиролиз	137	160	171
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,49	Горение	201	233	236
	10,54	Пиролиз	129	156	177
Допустимые значения					
АП-25, Приложение F, Часть V, не более		Горение	—	200	—
FAR/CS-25.853, Appl. F, part V, не более		Горение	—	200	—
ABD 0031 (Airbus)		Горение	—	250	—
		Пиролиз	—	150	—

Образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 без декоративного покрытия имеют оптическую плотность дыма через 4 мин горения ≤ 200 ед. Оптическая плотность дыма трехслойной сотовой панели с обшивками из стеклопластика ВПС-68 превышает 200 ед.

Как отмечено в работе [20], в условиях пожара опасность для человека определяется следующими факторами: воздействие высоких температур, распространение пламени по поверхности материалов, снижение видимости из-за выделения дыма и образование токсичных продуктов горения. Увеличение доли применения ПКМ во внутренней части самолета за последние годы существенно повысило вероятность отравления пассажиров продуктами горения. В связи с этим важной задачей для обеспечения пожарной безопасности ПКМ и конструкций на их основе является определение токсичности продуктов горения.

Поскольку в федеральных (государственных) авиационных нормах требования по токсичности продуктов горения не предъявляются, каждая авиастроительная корпорация сама принимает решение о необходимости введения требований по токсичности к материалам, применяемым в их авиационной технике, а также определяет метод испытания и предельно допустимые значения.

В процессе термического воздействия из ПКМ выделяется широкий спектр веществ, поэтому в мировой практике принято определять ограниченный перечень газов, максимально опасных для человеческого организма. Разными стандартами во внимание принимается различное количество газов. Например, военно-морской стандарт NATO STANAG 4602 подразумевает измерение концентраций 19 различных газов, при оценке токсичности по ГОСТ 12.1.044–89 определяются концентрации всего двух газов (CO и CO_2), некоторые документы устанавливают измерение концентраций трех газов (CO , CO_2 , HCl или CO , CO_2 , O_2).

В авиастроительных корпорациях Boeing и Airbus решили ограничиться измерением концентрации шести наиболее распространенных в продуктах горения неорганических токсичных газов, таких как NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), HCN , CO , HCl , SO_2 , HF . Компания Bombardier приняла решение измерять концентрации восьми газов: в перечень дополнительно включены углекислый газ и бромистый водород. Каждая из корпораций установила свои предельно допустимые значения концентраций газов. Концентрации газов измеряются в условиях проведения испытаний на дымообразование – отбор газов проводится непосредственно сразу после окончания теста.

Необходимо отметить, что установленные авиационными корпорациями предельно допустимые значения концентраций напрямую не связаны со среднесмертельными (вызывающими смертность 50 % лабораторных животных) концентрациями, предельно допустимыми концентрациями газов в воздухе пассажирских салонов самолетов (параграф 25.831 авиационных норм) или предельно допустимыми концентрациями в воздухе жилой застройки (например, согласно СанПиН 1.2.3685–21).

Учитывая пожелания отечественных авиастроителей – возможных потребителей разработанных материалов, проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 по определению токсичности продуктов горения (табл. 5). Для удобства сопоставления все значения приведены как в единицах измерения мг/м^3 , так и в концентрациях млн^{-1} (ppm). В этой же таблице представлены среднесмертельные концентрации, согласно зарубежным стандартам ASTM и ISO, установленные предельные концентрации.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что конструкции панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 полностью соответствуют международным стандартам, которые могут быть использованы в авиастроении. Вместе с тем установлено, что содержание угарного газа (оксида углерода) в режиме горения превышает пороговый показатель, который предъявляет корпорация ПАО «Яковлев» к своим изделиям.

Поскольку разработанные материалы не в полной мере соответствуют требованиям СБ-21 (ПАО «Яковлев»), изучение вопроса предельно допустимой концентрации угарного газа на человека представило дополнительный интерес.

Оксид углерода относится к ядовитым газам без запаха. В табл. 6 приведена информация из справочника [21] о симптомах отравления угарным газом человека.

Таблица 5

**Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций
панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59
и стеклопластика марки ВПС-68 на токсичность**

Материал	Средняя толщина образца, мм	Режим испытания	Концентрация газов, мг/м³ (ppm)								
			NO _x	HCN	CO	HCl	SO ₂	HF	HBr	CO ₂	O ₂
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,16	Горение	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	250 (200)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)	НИ		
		Пиролиз	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	100 (80)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,16	Горение	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	300 (240)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
		Пиролиз	<1 (<0,49)	<0,1 (<0,08)	150 (120)	<0,5 (<0,31)	<1 (<0,35)	<0,5 (<0,56)			
Допустимые значения											
ASTM E1678–2021	Пиролиз	Пиролиз	НР	181 (150)	НР	6030 (3700)	НР	НР	21400 (3000)	240000 (122000)	5,4 %
ISO 13344:2015			350 (170)	199 (165)	7120 (5700)	6200 (3800)	4000 (1400)	2590 (2900)	27100 (3800)		5,4 %
BSS 7239 (Boeing)	Горение	Горение	205 (100)	181 (150)	4375 3500	815 (500)	286 (100)	179 (200)	НР		
ABD 0031 (Airbus)			205 (100)	181 (150)	1250 (1000)	244 (150)		89 (100)			
SMP 800-C (Bombardier)			205 (100)	121 (100)	4375 (3500)	815 (500)			100 (714)	90000 (177000)	НР
СБ-21 (ПАО «Яковлев»)			13 (6,3)	13 (10,8)	200 (160)	1 (0,61)	1 (0,35)	1,5 (1,68)	НР		
Примечание. НИ – концентрация газа не измерялась, НР – концентрация газа не регламентируется.											

Таблица 6

**Сравнительная характеристика симптомов отравления
при длительном воздействии угарного газа**

Концентрация угарного газа, мг/м ³	Длительность воздействия	Симптомы отравления
80	8 ч	Отсутствуют
110	6,5 ч	
220	2–3 ч	
		Легкая боль в области лба
230	6 ч	Боль в области лба, ощущение давления на лоб, быстро исчезающее на свежем воздухе; расширение кожных кровеносных сосудов
230–340	5–6 ч	Головная боль, головокружение
440–460	2 ч	Боли в области лба и затылка
800–1000	20–30 мин	Головная боль, мышечная слабость, тошнота
1350	33–90 мин	Сердцебиение, легкое пошатывание, одышка при мышечной работе
1760	20 мин	Головная боль, головокружение, тошнота
3520	5–10 мин	Головная боль, головокружение
7040	1–2 мин	

В соответствии с требованиями СБ-21 (ПАО «Яковлев»), концентрация угарного газа не должна превышать 200 мг/м³ при горении материала в течение 90 с. Концентрация угарного газа, образующегося при горении трехслойной сотовой панели с обшивкой из углепластика ВКУ-59 и стеклопластика ВПС-68, составила 250 и 300 мг/м³ соответственно.

Продолжительность эвакуации из самолета в случае летного происшествия в соответствии с требованиями авиационных норм не должна превышать 1,5 мин (90 с). За это время при концентрации угарного газа 7000 мг/м³ у людей не происходит потери сознания и не теряется возможность передвижения.

В случае возникновения летного происшествия во время полета допустимая в обычных эксплуатационных условиях концентрация угарного газа 1 часть на 20000 частей воздуха (50 млн⁻¹) обеспечивается за счет вентиляции. Концентрация СО снижается с 240 млн⁻¹ (300 мг/м³) до 50 млн⁻¹ за счет всего пятикратного обмена воздуха.

В требованиях ПАО «Яковлев» предельно допустимые концентрации токсичных газов, по сравнению с аналогичными нормами зарубежных авиастроителей, занижены в 5–800 раз, а по сравнению с переносимыми без дальнейшего вреда концентрациями – завышены более чем в 35 раз для СО и более чем в 10–100 раз для других газов. Данное обстоятельство обращает внимание на необходимость внесения требований в СБ-21 (ПАО «Яковлев») исходя из общих принципов понимания токсикологии.

Заключения

По результатам испытаний на горючесть установлено полное соответствие требованиям авиационных норм углепластика марки ВКУ-59, стеклопластика марки ВПС-68 и сотовых конструкций на их основе.

Стекло-, углепластик и трехслойная панель на их основе обладают высокой дымообразующей способностью. Однако, согласно требованиям государственных авиационных норм, этот факт не является препятствием для применения трехслойных сотовых панелей данного состава в качестве панелей пола в пассажирской кабине, а также в качестве панелей пола, стен и потолка в багажно-грузовых отсеках.

Токсичность продуктов горения полимерных материалов в настоящее время в государственных авиационных нормах не регламентируется. Результаты испытаний на токсичность продуктов, выделяемых в процессе горения трехслойных сотовых конструкций панелей пола, показали соответствие требованиям, установленным ведущими мировыми авиастроительными корпорациями (Boeing, Airbus, Bombardier).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-011 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. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.

2. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
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. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. Т. 10: Клеи, герметики, резины, гидрожидкости, ч. 1: Клеи, клеевые препреги, 2019. 276 с.
5. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных 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.
6. Вольнов О.И., Дудукин Д.О. Стеклопластик. История развития, технология производства, формообразование деталей и современное применение // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 400–404.
7. Курносов А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ. 2015. № 8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
8. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
9. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. The influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of VSK-14-6 adhesive binder on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the curing kinetics of prepregs based on VSK-14-1 adhesive binder // Polymer science. Series D. 2023. Vol. 16. No. 4. P. 882–891.
10. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
11. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
12. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
13. Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Когтенков А.С. Новые разработки в области клеящих материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459.
14. Борщев А.В., Гусев Ю.А. Полимерные композиционные материалы в автомобильной промышленности // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
15. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
17. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.

18. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // *Успехи в химии и химической технологии*. 2019. Т. XXXIII. № 6. С. 62–64.
19. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
20. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 2. Испытания на горючесть. Влияние продолжительности экспозиции пламенем горелки // *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т. 24. № 3. С. 13–23.
21. Вредные вещества в промышленности: в 20 т. 5-е изд., стереотипное. М.–Л.: Химия, 1965. Т. 2. Неорганические и элементоорганические соединения. 620 с.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
3. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
4. *Aviation materials: handbook in 13 vols.* Ed. by E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, vol. 10: Adhesives, sealants, rubbers, hydraulic fluids, part 1: Adhesives, adhesive prepregs, 2019, 276 p.
5. Vavilova M.I., Kavun N.S. The properties of glass filler for constructions of fiberglass. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 3, pp. 33–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.
6. Volnov O.I., Dudukin D.O. Fiberglass. History of development, production technology, shaping of parts and modern application. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*, 2014, no. 5 (107), pp. 400–404.
7. Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Structural glass-reinforced plastics purposed for aviation industry. *Trudy VIAM*, 2015, no. 8, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
8. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
9. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. The influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of VSK-14-6 adhesive binder on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the curing kinetics of prepregs based on VSK-14-1 adhesive binder. *Polymer science. Series D*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 882–891.
10. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs: textbook*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
11. Perov N.S. Design of polymeric materials on the molecular principles. II. The molecular mobility in the cross-linked complex systems. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
12. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
13. Lukina N.Ph., Petrova A.P., Muhametov R.R., Kogtenkov A.S. New developments in the field of adhesive aviation materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 452–459. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-452-459.

14. Borshchev A.V., Gusev Yu.A. Polymer composite materials in automotive industry. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
15. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Valueva M.I., Barbotko S.L. Fire safety of high-temperature carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150.
16. Kutsevich K.E., Dementeva L.A., Lukina N.F., Tyumeneva T.Yu. Adhesive prepregs as promising materials for parts and assemblies from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
17. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Low-combustibility adhesive prepregs designed for the manufacture of integral and three-layer honeycomb structures aircraft technology. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
18. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon fiber reinforced plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. XXXIII, no. 6, pp. 62–64.
19. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
20. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyeenko O.A., Shurkova E.N. Features of testing aviation materials for fire hazard. Part 2. Combustibility tests. Effect of burner flame exposure duration. *Pozharovzryvbezopasnost*, 2015, vol. 24, no. 3, pp. 13–23.
21. *Harmful substances in industry*: in 20 vols. 5th ed., stereotyped. Moscow–Leningrad: Khimiya, 1965, vol. 2. Inorganic and organoelement compounds, 620 p.

Информация об авторах

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

Куцевич Кирилл Евгеньевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Барботко Сергей Львович, начальник сектора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Kirill E. Kutsevich, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Sergey L. Barbotko, Head of Sector, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.01.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 29.01.2025.

Научная статья

УДК 667.6:535.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97

КЛИМАТИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ СИСТЕМ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ* Часть 2. Влияние различных климатических зон

В.О. Старцев¹

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

Аннотация. Показано различие в изменении цветового расстояния образцов алюминиевого сплава с нанесенной эпоксидной и фторполиуретановой эмалями с пигментами красного и серого цвета при экспонировании в климатических зонах умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата. Рассчитаны параметры временной экспоненциальной модели, описывающей изменение цветового расстояния. Обнаружено существенное отличие изменения цветового расстояния в умеренном и умеренно теплом климате от значений данного показателя в сухом субтропическом климате.

Ключевые слова: климатическое старение, лакокрасочное покрытие, цветовое расстояние, солнечная радиация, математическое моделирование, прогнозирование

Для цитирования: Старцев В.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 2. Влияние различных климатических зон // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.

Scientific article

CLIMATE AGING OF PAINT COATING SYSTEMS Part 2. Influence of different climatic zones

V.O. Startsev¹

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

Abstract. The second part of the article series on climatic aging of paint coating systems shows the difference in the change in the color distance of aluminum alloy samples with applied epoxy and fluoropolyurethane enamels with red and gray pigments when exposed to climatic zones of moderate, moderately warm and dry subtropical climates. The article provides the calculation of parameters of the time exponential model describing the change in the color distance. As a result there has been found a significant difference in the change in the color distance in moderate and moderately warm climate from the same indicators of a dry subtropical climate.

Keywords: climatic aging, paint coating, color distance, solar radiation, mathematical modeling, forecasting

For citation: Startsev V.O. Climate aging of paint coating systems. Part 2. Influence of different climatic zones. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-86-97.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 5 (147), 2025.

Введение

Системы лакокрасочных покрытий (ЛКП), защищающие поверхность материалов от климатического воздействия [1, 2], изменяют свои цветовые и декоративные показатели вследствие сочетания физических и химических превращений. В научнотехнической литературе рассмотрены разнообразные колориметрические, спектрометрические, электрохимические и другие тонкие физические методы, которые позволяют выявить механизмы физико-химических превращений в ЛКП под действием температуры, влажности, ультрафиолетовых компонентов солнечной радиации [3].

Механизмы этих превращений рассмотрены в работах [4–6]. Например, во фторполиуретановом покрытии, нанесенном на стеклопластик, под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца активируются процессы деструкции и сшивки [4]. Методом динамического механического анализа показано, что релаксационный максимум динамического модуля потерь является суперпозицией α_1 -, α_2 -, α_3 -переходов, относящихся к переходам из стеклообразного в высокоэластическое состояние эмали ВЭ-69 и эпоксидной грунтовки ЭП-0215. Температура перехода α_1 , являющаяся температурой стеклования фторполиуретана ВЭ-69, после 3 лет экспозиции уменьшается пропорционально среднегодовой температуре воздуха региона. Температуры переходов α_2 и α_3 после натурной экспозиции вследствие доотверждения повысились на 13–15 °С и приобрели стабильные значения вне зависимости от климатических условий испытаний. Чувствительность методов динамического механического и термомеханического анализа позволяет выявить подобные эффекты в тонких слоях покрытий и грунтовок, а также оценить влияние их состава на атмосферостойкость ЛКП [4–6]. Химические превращения в ЛКП зависят от температуры их поверхности в открытых натуральных условиях [7] и сопровождаются изменениями показателей влагопереноса, влияющих на уровень свойств защищаемых материалов [8].

Для применяемых в авиационной промышленности материалов востребованы полиуретановые покрытия для защиты от абразивных воздействий и эрозионного износа, модифицированные эпоксидные покрытия с улучшенными эксплуатационными свойствами [9], покрытия с повышенной износостойкостью [10]. Проведенные климатические испытания эпоксидных и фторполиуретановых покрытий [11, 12] позволили выявить ряд особенностей старения в различных климатических зонах. В частности, показано, что в условиях влажных тропиков наблюдается более высокая скорость снижения декоративных свойств. Исследование изменения декоративных свойств, таких как блеск и колориметрические показатели, часто используется при проведении климатических испытаний для оценки старения материалов. В работе [13] исследованы особенности старения покрытия на основе акриловой смолы при добавлении органических пигментов различных цветов и без них. Показано, что морфология поверхностей образцов зависит от наличия пигментов. Покрытия, не содержащие пигмента, менее стойкие к старению в открытых атмосферных условиях.

В работе [14] представлены результаты масштабного исследования старения нескольких систем ЛКП, нанесенных на зеркала, в двух климатических зонах Марокко (морское побережье и пустыня) в течение 22 мес. Старение оценивали методом инфракрасной спектроскопии и путем контроля изменения колориметрических показателей. Анализ изменений в различных климатических зонах показал, что химическая деградация покрытий вызвана воздействием не только солнечной радиации, но и влажности, осадков, эрозии. Для исследования влияния каждого фактора необходимо проведение ускоренных климатических испытаний для прямого сравнения с результатами натурных испытаний. Поиск достоверных соответствий между результатами натурных и ускоренных испытаний является предметом исследований многих работ [15–23].

В работе [24] приведены результаты исследования цветовых показателей алкидных, эпоксидных и полиуретановых систем ЛКП, нанесенных на стальные образцы, при натурных климатических испытаниях в условиях тропического климата. Полученные зависимости изменения цветовых показателей в сочетании с результатами других исследований позволили ранжировать покрытия по защитной способности и выявить необходимость изучения отдельных факторов, таких как температура нагрева, циклы увлажнения поверхности образцов и др.

В работе [25] представлена система ускоренных климатических испытаний стальных образцов с эпоксидными и полиуретановыми покрытиями для имитации натурального экспонирования в условиях тропического климата. Исследования изменения адгезии и цветовых показателей позволили определить режимы имитационных испытаний с наилучшим соответствием с результатами натурных климатических испытаний.

Цель данной статьи – исследование изменения цветовых показателей ЛКП с фторполиуретановой и эпоксидной эмалями с добавлением пигментов красного и серого цвета при экспонировании в условиях умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата в течение 2 лет.

Материалы и методы

Для проведения масштабных исследований климатического старения систем ЛКП изготовлено 700 образцов. В качестве подложки использован алюминиевый деформируемый сплав, из листа которого методом гидроабразивной резки подготовлены образцы размером 150×75×1 мм. Образцы подвергли сернокислотному оксидированию с последующим наполнением в хромпике. После этого на поверхность образцов нанесено два грунтовых слоя холодной и горячей сушки. Все образцы разделены на четыре группы по 175 образцов. На образцы групп 1 (маркировка 1–175) и 2 (маркировка 176–350) нанесено фторполиуретановое покрытие ВЭ-69 с добавлением пигментов красного и серого цвета соответственно. На образцы групп 3 (маркировка 351–525) и 4 (маркировка 526–700) нанесено эпоксидное покрытие ЭП-140 с добавлением пигментов красного и серого цвета соответственно. Пример наборов образцов из групп 1 и 2 показан на рис. 1.



Рис. 1. Образцы алюминиевого сплава с нанесенной системой лакокрасочного покрытия на основе фторполиуретановой эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета

Часть образцов выставлена на натурное экспонирование в условиях умеренного, умеренно теплого [26, 27] и сухого субтропического климата в начале весеннего сезона (март 2022 г.). Внешний вид стендов показан на рис. 2, а основные показатели климатических зон за период экспонирования приведены в табл. 1.



Рис. 2. Образцы алюминиевого сплава с нанесенными системами лакокрасочных покрытий на стендах для проведения экспонирования в условиях умеренного (а), умеренно теплого (б) и сухого субтропического климата (в)

Таблица 1

Климатические показатели умеренного, умеренно теплого и сухого субтропического климата за период проведения испытаний

Показатель	Значения показателя для климата		
	умеренно теплого	умеренного	сухого субтропического
Среднегодовая температура воздуха, °С	14,8	7,6	20,3
Среднегодовая относительная влажность воздуха, %	73	72	27
Годовое суммарное количество осадков, мм	665	517	52
Годовое количество дней с осадками, сут	108	212	11
Годовое количество дней с пыльными явлениями, сут	—	—	52
Годовое суммарное количество солнечного сияния, ч	2375	1731	3381
Годовая величина суммарной солнечной радиации, МДж/м ²	5030	4405	10765

В сухом субтропическом климате обращают на себя внимание высокая среднегодовая температура воздуха (20,3 °С), экстремально низкие среднегодовая относительная влажность воздуха (27 %) и суммарное количество осадков (52 мм), а также высокое значение годовой величины солнечной радиации (10765 МДж/м²).

При натурном экспонировании с помощью спектрофотометра со сферической геометрией измерения в соответствии с ГОСТ Р 71216–2024 еженедельно определяли значения различия цвета, светлоты, цветового тона систем ЛКП на образцах и рассчитывали значение полного цветового различия (цветового расстояния) ΔE в системе CIE L*a*b*.

Полученные значения цветового расстояния аппроксимировали с помощью соотношения [28, 29]

$$\Delta E = \Delta E_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (1)$$

где $\Delta E_{\max}$ – предельное значение цветового расстояния, усл. ед.; t – продолжительность экспонирования, сут; τ – параметр, характеризующий срок достижения $0,63\Delta E_{\max}$, сут.

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

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны изменения цветового расстояния системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 при открытом натурном экспонировании в трех климатических зонах, на рис. 4 – аналогичные зависимости для ЛКП на основе эмали ВЭ-69.

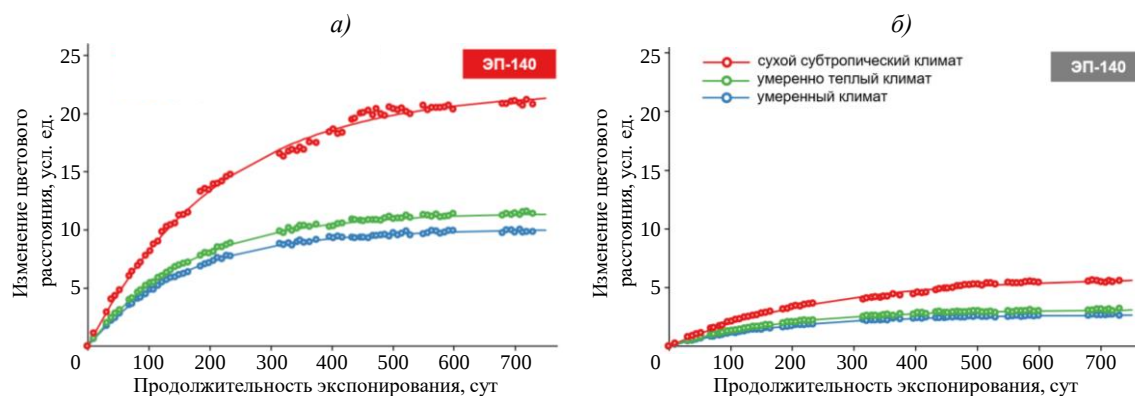


Рис. 3. Изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натурных климатических испытаниях в трех климатических зонах: точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

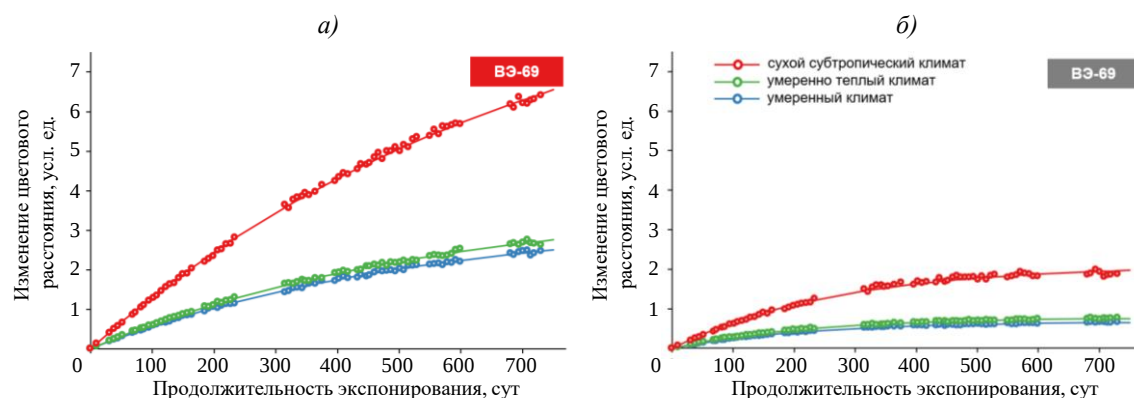


Рис. 4. Изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натурных климатических испытаниях в трех климатических зонах: точки – экспериментальные данные, линии – модель (1)

Значение изменения цветового расстояния за двухлетний период экспонирования системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 существенно зависит от цвета пигмента: диапазон ΔE для образцов с пигментом красного и серого цвета составляет 10,11–20,79 и 2,00–5,55 усл. ед. соответственно. Таким образом, изменение цветового расстояния различается в 3,4–3,7 раза, причем наибольшее отличие зафиксировано для образцов, которые экспонировали в условиях сухого субтропического климата. Цветовое расстояние системы с красным пигментом изменяется в основном в первый год экспонирования. В сухом субтропическом климате это изменение составило 85 % от изменения цвета за весь период экспонирования, в умеренном и умеренно теплом – более 90 %.

Для системы ЛКП на основе эмали ЭП-140 с серым пигментом отмечено снижение этого соотношения. В сухом субтропическом климате в течение первого года наблюдается 80 % изменения цветового расстояния от изменения цвета за весь период экспонирования, в умеренном и умеренно теплом: 87 %.

Изменение цветового расстояния системы ЛКП с эмалью ВЭ-69 при натурном экспонировании значительно меньше, чем у системы ЛКП на основе эмали ЭП-140. При экспонировании в сухом субтропическом климате изменение цветового расстояния системы на основе эмали ВЭ-69 и с красным, и с серым пигментом меньше в 3 раза по

сравнению с аналогичным изменением для системы на основе эмали ЭП-140. При экспонировании в умеренном и умеренно теплом климате аналогичные показатели различаются в 4 раза.

Изменение цветового расстояния ЛКП на основе эмали ВЭ-69 в первый год экспонирования также отличается от значений данного показателя для системы с эмалью ЭП-140: во всех климатических зонах наблюдается 60–65 % от общего изменения за весь срок экспонирования при добавлении красного пигмента, 80 % – при использовании серого пигмента. Следует отметить, что изменение цвета в системах с добавлением серого пигмента при экспонировании во всех климатических зонах и с добавлением красного цвета при экспонировании в условиях умеренного и умеренно теплого климата в течение 2 лет не превышает 2,7 усл. ед., т. е. не наблюдается невооруженным глазом. Это свидетельствует о высокой стойкости ЛКП.

Рассчитанные параметры модели (1) для экспериментальных данных указаны в табл. 2. Как видно, модель (1) адекватно описывает экспериментальные данные. Коэффициент детерминации составляет 0,97–0,99, значение среднеквадратичной ошибки: 0,01–0,14.

Таблица 2

Параметры модели (1) по данным за весь период натурного экспонирования в трех климатических зонах

Эмаль	Цвет пигмента	Климат	$\Delta E_{\max}$, усл. ед.	τ , сут	MSE	R^2
ЭП-140	Красный	Сухой субтропический	21,96	213	0,14	0,97
		Умеренно теплый	11,46	162	0,03	0,98
		Умеренный	10,06	158	0,03	0,98
	Серый	Сухой субтропический	5,89	246	0,12	0,97
		Умеренно теплый	3,13	186	0,02	0,98
		Умеренный	2,71	190	0,02	0,98
ВЭ-69	Красный	Сухой субтропический	10,21	731	0,08	0,98
		Умеренно теплый	3,72	555	0,02	0,99
		Умеренный	3,32	534	0,02	0,99
	Серый	Сухой субтропический	2,36	388	0,05	0,98
		Умеренно теплый	0,78	221	0,01	0,99
		Умеренный	0,38	227	0,01	0,99

Примечание. $\Delta E_{\max}$ – предельное значение цветового расстояния; τ – параметр, характеризующий срок достижения $0,63\Delta E_{\max}$; MSE – среднеквадратичная ошибка; R^2 – коэффициент детерминации.

Ранее показано, что основным воздействующим фактором при изменении цветового расстояния систем ЛКП при натурном экспонировании является доза солнечной радиации. На рис. 5 приведена диаграмма накопленной дозы солнечной радиации в различных климатических зонах. В сухом субтропическом климате величина накопленной дозы солнечной радиации в 2 раза превышает значения для умеренного и умеренно теплого климата. Кроме того, отчетливо наблюдается сезонность: скорость накопления дозы солнечной радиации снижается в осенне-зимний период и увеличивается в весенне-летний период. Анализ метеоданных за двухлетний период показывает, что в умеренном климате в весенне-летний период накапливается 85 % от годовой дозы солнечной радиации, в осенне-зимний период: 15 %. В умеренно теплом климате это соотношение составляет 70 и 30 %, а в сухом субтропическом: 60 и 40 % соответственно.

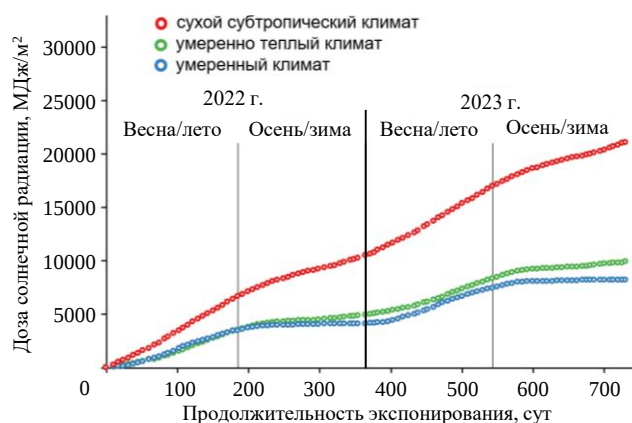


Рис. 5. Зависимости накопления дозы солнечной радиации от продолжительности экспонирования лакокрасочных покрытий в умеренном, умеренно теплом и сухом субтропическом климате

Характер зависимостей изменения цветового расстояния исследованных систем ЛКП от поглощенной дозы солнечной радиации (рис. 6 и 7) отличается от временных зависимостей (рис. 3 и 4).

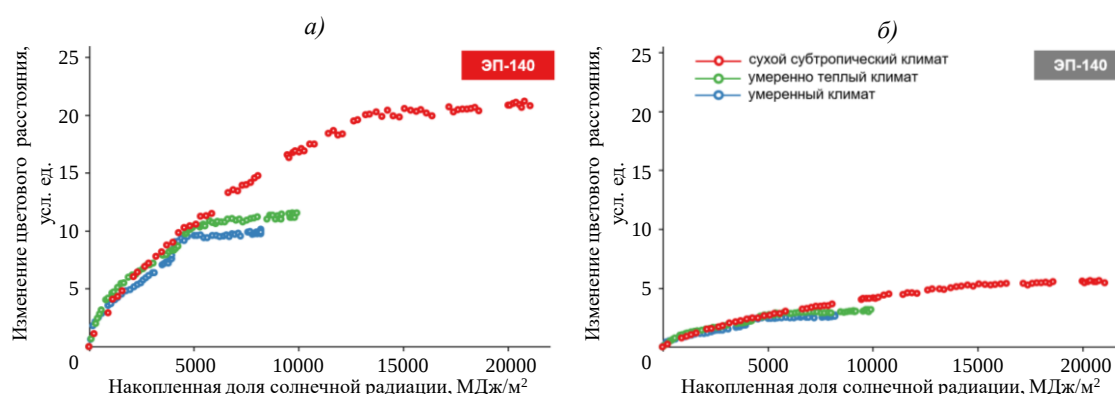


Рис. 6. Зависимости изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ЭП-140 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натурных климатических испытаниях в трех климатических зонах от накопленной дозы солнечной радиации

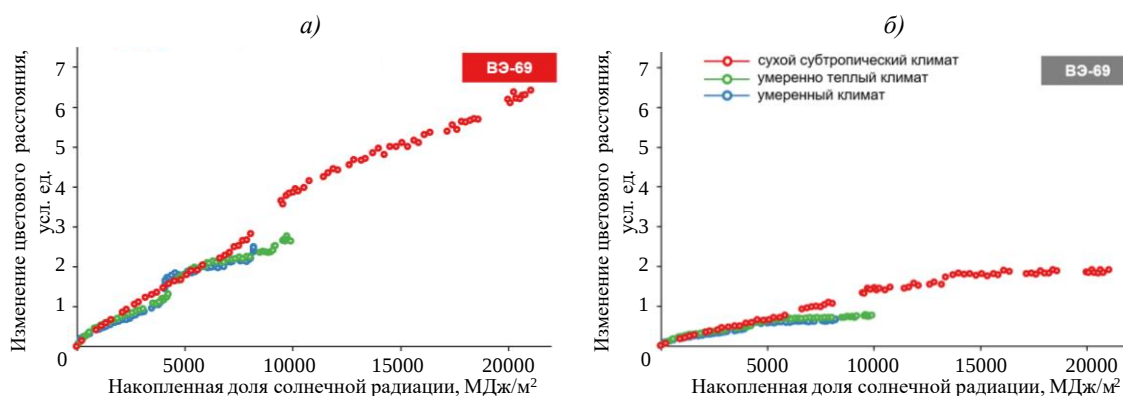


Рис. 7. Зависимости изменения цветового расстояния системы лакокрасочного покрытия на основе эмали ВЭ-69 с добавлением пигментов красного (а) и серого (б) цвета при натурных климатических испытаниях в трех климатических зонах от накопленной дозы солнечной радиации

Для всех исследованных систем ЛКП с различными пигментами наблюдается одинаковый характер изменения цветового расстояния до набора дозы солнечной радиации $\sim 3500 \text{ МДж/м}^2$ во всех климатических зонах. После этого значения характер изменения цветового расстояния в умеренном и умеренно теплом климате остается схожим, а в сухом субтропическом климате значительно изменяется. Использование модели (1) для аппроксимации экспериментальных данных с дозой накопленной радиации в качестве аргумента показывает, что среднеквадратичная ошибка возрастает до 0,26–0,87, а коэффициент детерминации снижается до 0,74–0,83. Это означает, что, помимо солнечной радиации, есть другие значимые факторы воздействия, влияющие на изменение цветовых показателей в сухом субтропическом климате. Согласно данным табл. 1, в сухом субтропическом климате в течение года наблюдается более 50 дней с пыльными явлениями. Возможно, дополнительное воздействие песка и пыли в сухом субтропическом климате, незначительное в первые 3,5 мес. (за период накопления дозы солнечной радиации до 3500 МДж/м^2), становится значимым при дальнейшем экспонировании. Дополнительным аргументом в пользу этой гипотезы является тот факт, что характер кривых изменения цветового расстояния для умеренного и умеренно теплого климата одинаков. Для достоверного подтверждения этой гипотезы будут проведены дополнительные исследования влияния песка и пыли на изменение цветового расстояния систем ЛКП.

Заключения

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- климатическая стойкость, проанализированная по изменению цветового расстояния, ЛКП на основе фторполиуретановой эмали в 3–4 раза больше, чем систем с эпоксидной эмалью;
- экспериментальные данные изменения цветового расстояния адекватно описываются с помощью предложенной экспоненциальной модели;
- изменения цветового расстояния исследованных систем покрытия в сухом субтропическом климате в 2–4 раза больше, чем в умеренном и умеренно теплом климате;
- характер изменения цветового расстояния в координатах накопленной дозы солнечной радиации одинаков на начальной стадии экспонирования в трех климатических зонах;
- значимым фактором, влияющим на изменение цветового расстояния, помимо накопленной дозы солнечной радиации, является воздействие песка и пыли.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
2. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В., Афонин В.В., Каблов Е.Н. и др. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11. С. 911–924.
3. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36. No. 4. P. 1–35.
4. Лебедев М.П., Старцев О.В., Коваль Т.В., Велигодский И.М. Мультиплетные релаксационные α -переходы во фторуретановом покрытии после климатического старения // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2024. Т. 516. № 1. С. 45–51.

5. Старцев О.В., Махоньков А.Ю., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Исследование старения углепластика КМУ-4Л после 12 лет экспонирования на международной космической станции методом динамического механического анализа. 2. Влияние места расположения пластин в многослойных пачках // Вопросы материаловедения. 2013. № 4. С. 69–76.
6. Старцев О.В., Болонин А.Б., Вапиров Ю.М. и др. Улучшение вязкоупругих свойств акриловой эмали АС-1115 // Лакокрасочные материалы и их применение. 1986. № 4. С. 16–18.
7. Старцев О.В., Медведев И.М., Кротов А.С., Панин С.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натурных условиях // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 7. С. 43–47.
8. Старцев О.В., Коваль Т.В., Кротов А.С., Велигодский И.М. Моделирование десорбции влаги из углепластика с защитными покрытиями после длительного климатического старения // Коррозия: материалы, защита: приложение к журналу «Технология металлов». 2024. № 17. С. 1–10.
9. Кузнецова В.А., Емельянов В.В., Шаповалов Г.Г., Коврижкина Н.А. Применение модификаторов для повышения эксплуатационных свойств лакокрасочных покрытий на основе эпоксидных пленкообразующих (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 12 (106). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-63-72.
10. Кузнецова В.А., Тимошина Е.А., Шаповалов Г.Г., Железняк В.Г. Тенденции в области разработки матовых износостойких лакокрасочных покрытий // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
11. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Кодаченко Е.Н., Железняк В.Г. Исследование влияния химической природы грунтовочного слоя на свойства системы покрытий на основе фторполиуретановой эмали // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 09. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Меркулова Ю.И., Куршев Е.В., Вдовин А.И., Андреева Н.П. Микроструктурные и электрохимические исследования лакокрасочных покрытий в условиях натурных климатических испытаний тропического климата Северной Америки // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 11. URL <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
13. Dao P.H., Nguen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment // Vietnam Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 56. No. 3B. Art. 126.
14. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 4. Art. 476.
15. Knudsen O.Ø., Skilbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance // Materials Today Communications. 2022. Vol. 31. Art. 103729.
16. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing // Progress in Organic Coatings. 2000. Vol. 39. No. 1. P. 67–78.
17. Li S., Be H., Weinell C.E. et al. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test // Progress in Organic Coatings. 2023. Vol. 184. Art. 107866.
18. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D. et al. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test // Coatings. 2022. Vol. 12. No. 11. Art. 1758.
19. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships // Materials and Corrosion. 2015. Vol. 66. No. 3. P. 215–225.

20. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P. et al. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions // *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 108. P. 90–92.
21. Pavlenko V., Manuylov V., Kuzhel V. et al. Research on testing methods for the corrosion resistance of paint coatings // *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2024. Vol. 18. No. 2. P. 127–133.
22. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A. et al. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities // *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 385–393.
23. Saha J.K., Mitra P.K., Pau S. et al. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests // *Indian Journal of Chemical Technology*. 2010. Vol. 17. No. 2. P. 102–110.
24. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N. et al. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 1363–1373.
25. Gao J., Hu W., Wang R. et al. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments // *Polymer Testing*. 2021. Vol. 100. Art. 107259.
26. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 9. С. 16–26.
27. Старцев В.О., Молоков М.В., Старцев О.В. и др. Влияние алифатического разбавителя ЭТАЛ-1 на климатическую стойкость эпоксидных полимеров на основе смолы ЭД-20 // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. № 12. С. 26–36.
28. Старцев В.О., Коган А.М., Зеленева Т.О. Климатическое старение систем лакокрасочных покрытий. Часть 1. Влияние длительных сроков экспонирования на цветовые показатели // *Труды ВИАМ*. 2025. № 5 (147). Ст. 08. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
29. Старцев В.О., Низина Т.А. Прогнозирование климатического старения эпоксидных полимеров по изменению цветовых показателей // *Труды ВИАМ*. 2015. № 12. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

References

1. Kablov E.N., Semenova L.V., Eskov A.A., Lebedeva T.A. Complex systems of paint and varnish coatings for the protection of metal polymer composite materials, as well as their contact joints from the effects of aggressive factors. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2016, no. 6, pp. 32–35.
2. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V., Afonin V.V., Kablov E.N. et al. Study of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 11, pp. 911–924.
3. Zhang Ti., Zhang Te., He Y. et al. Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 1–35.
4. Lebedev M.P., Startsev O.V., Koval T.V., Veligodskiy I.M. Multiplet relaxation α -transitions in a fluororethane coating after climatic aging. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Khimiya, nauki o materialakh*, 2024, vol. 516, no. 1, pp. 45–51.
5. Startsev O.V., Makhonkov A.Yu., Deev I.S., Nikishin E.F. Study of aging of KMU-4L carbon fiber reinforced plastic after 12 years of exposure on the International Space Station using the method of dynamic mechanical analysis. 2. Effect of plate location in multilayer stacks. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 4, pp. 69–76.
6. Startsev O.V., Bolonin A.B., Vapirov Yu.M. et al. Improving the viscoelastic properties of acrylic enamel AC-1115. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 1986, no. 4, pp. 16–18.
7. Startsev O.V., Medvedev I.M., Krotov A.S., Panin S.V. Dependence of the surface temperature of samples on the climate characteristics during exposure under natural conditions. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 7, pp. 43–47.

8. Startsev O.V., Koval T.V., Krotov A.S., Veligodsky I.M. Modeling of moisture desorption from carbon fiber with protective coatings after long-term climatic aging. *Korroziya: materialy, zashchita*: Supplement to the journal «*Tekhnologiya metallov*», 2024, no. 17, pp. 1–10.
9. Kuznetsova V.A., Yemelyanov V.V., Shapovalov G.G., Kovrizhkina N.A. Use of modifiers for increase of operational properties of paint coatings on the basis of the epoxy film-forming (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 12 (106), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-63-72.
10. Kuznetsova V.A., Timoshina E.A., Shapovalov G.G., Zheleznyak V.G. Trends in the development of matte wear-resistant paint coatings. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-132-144.
11. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Kodachenko E.N., Zheleznyak V.G. Study of the influence of the primer layer's chemical nature on the properties of the coating system based on fluoropolyurethane enamel. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-110-119.
12. Merkulova Yu.I., Kurshev E.V., Vdovin A.I., Andreeva N.P. Microstructural and electrochemical studies of paint coatings under natural climate tests of tropical climate of North America. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-120-130.
13. Dao P.H., Nguen A.H., Mac V.P. et al. Aging of waterborne paint based on the acrylic resin emulsion and organic pigment. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 2018, vol. 56, no. 3B, art. 126.
14. Guerguer M., Naamane S., Edfouf Z. et al. Chemical degradation and color changes of paint protective coatings used in solar glass mirrors. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 4, art. 476.
15. Knudsen O.Ø., Skilbred A.W.B., Løken A. et al. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 31, art. 103729.
16. Bierwagen G.P., He L., Li J. et al. Studies of a new accelerated evaluation method for coating corrosion resistance – thermal cycling testing. *Progress in Organic Coatings*, 2000, vol. 39, no. 1, pp. 67–78.
17. Li S., Be H., Weinell C.E. et al. A quantitative real-time evaluation of rust creep propagation in coating systems exposed to field testing and cyclic ageing test. *Progress in Organic Coatings*, 2023, vol. 184, art. 107866.
18. Pélissier K., Le Bozec N., Thierry D. et al. Evaluation of the Long-Term Performance of Marine and Offshore Coatings System Exposed on a Traditional Stationary Site and an Operating Ship and Its Correlation to Accelerated Test. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 11, art. 1758.
19. LeBozec N., Thierry D., Le Calvé P. et al. Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships. *Materials and Corrosion*, 2015, vol. 66, no. 3, pp. 215–225.
20. Momber A.W., Buchbach S., Plagemann P. et al. Edge coverage of organic coatings and corrosion protection over edges under simulated ballast water tank conditions. *Progress in Organic Coatings*, 2017, vol. 108, pp. 90–92.
21. Pavlenko V., Manuylov V., Kuzhel V. et al. Research on testing methods for the corrosion resistance of paint coatings. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2024, vol. 18, no. 2, pp. 127–133.
22. Revin P.O., Makarenko A.V., Harisov R.A. et al. Research of underwater applied coatings for corrosion protection of port facilities. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 385–393.
23. Saha J.K., Mitra P.K., Pau S. et al. Performance of different organic coatings on steel substrate by accelerated and in atmospheric exposure tests. *Indian Journal of Chemical Technology*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 102–110.

24. Chu M.T., Do D.T., Sereda V.N. et al. Correlation between climate testing methods and service life prediction for paint systems. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2023, vol. 12, no. 3, pp. 1363–1373.
25. Gao J., Hu W., Wang R. et al. Study on a multifactor coupling accelerated test method for anticorrosive coatings in marine atmospheric environments. *Polymer Testing*, 2021, vol. 100, art. 107259.
26. Startsev V.O. Methods for studying the aging of polymer binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 9, pp. 16–26.
27. Startsev V.O., Molokov M.V., Startsev O.V. et al. The effect of the aliphatic diluent ETAL-1 on the climatic resistance of epoxy polymers based on ED-20 resin. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2016, no. 12, pp. 26–36.
28. Startsev V.O., Kogan A.M., Zeleneva T.O. Climate aging of paint coating systems. Part 1. Effect of long-term exposure on color characteristics. *Trudy VIAM*, 2025, no. 5 (147), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-5-99-111.
29. Startsev V.O., Nizina T.A. The modeling of epoxy polymers weathering by the color characteristics measurements. *Trudy VIAM*, 2015, no. 12, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-10-10.

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.02.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.02.2025.

Научная статья

УДК 678.8:620.179

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ГЛУБИНЫ ДЕФЕКТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

С.С. Пичугин¹, С.И. Яковлева¹, В.В. Кулаков², М.А. Измайлов², А.П. Королев²

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

²Публичное акционерное общество «Авиационная корпорация «Рубин», Балашиха, Московская область, Россия; info@acrubin.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность оценки специфических дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах, вихретоковым методом неразрушающего контроля. С помощью разработанной математической модели распределения электромагнитных полей проанализировано влияние ряда параметров на оценку глубины дефектов: диаметр абсолютного трансформаторного накладного вихретокового преобразователя, частота возбуждающего тока и ориентация дефектов относительно поверхности. Определена чувствительность при оценке глубины дефекта для разных значений частоты возбуждающего тока и диаметра преобразователя. Возможность оценки крупных дефектов подтверждена результатами испытаний на образце-имитаторе с пропилами разной глубины из углерод-углеродного композиционного материала.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, вихретоковый контроль, оценка глубины, накладной вихретоковый преобразователь, математическое моделирование

Для цитирования: Пичугин С.С., Яковлева С.И., Кулаков В.В., Измайлов М.А., Королев А.П. Выбор параметров вихретокового контроля при оценке глубины дефектов, возникающих в углерод-углеродных композиционных материалах // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109.

Scientific article

SELECTION OF EDDY CURRENT TESTING PARAMETERS DURING THE ESTIMATION OF DEFECTS' DEPTH IN CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS

S.S. Pichugin¹, S.I. Yakovleva¹, V.V. Kulakov², M.A. Izmailov², A.P. Korolev²

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

²Public Joint Stock Company «Rubin Aviation Corporation», Balashikha, Moscow region, Russia; info@acrubin.ru

Abstract. The article treats the possibility of estimation of specific defects occurring in carbon-carbon composite materials by eddy current method of nondestructive testing. With the help of the developed mathematical model of electromagnetic field distribution, there has been analyzed the influence of the range of parameters on the estimation of the defects' depth including the diameter of the absolute transformer overhead eddy current converter and the frequency of the excitation current on the estimation of the depth of such defects, as well as the influence of the defect orientation relative to the surface. The article analyzes sensitivity of defect depth estimation for different values of excitation current frequency and transducer

diameter. The possibility of large defects estimation is confirmed by means of tests on specimens-simulators with kerfs of different depth made of carbon-carbon material.

Keywords: carbon-carbon composite material, eddy current testing, depth estimation, surface eddy current probe, mathematical modeling

For citation: Pichugin S.S., Yakovleva S.I., Kulakov V.V., Izmailov M.A., Korolev A.P. Selection of eddy current testing parameters during the estimation of defects' depth in carbon-carbon composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-98-109.

Введение

Тормозные системы имеют ключевое значение для обеспечения безопасности транспортных средств, в том числе в авиастроении. Они должны обеспечивать надежную работу в различных условиях, включая высокую температуру, влажность и механические нагрузки. Для достижения этих целей используются специальные фрикционные материалы, которые обладают высокой износостойкостью, необходимыми теплопроводностью и коэффициентом трения, обеспечивают эффективное торможение в различных условиях эксплуатации.

Примером таких материалов служат углерод-углеродные фрикционные материалы (УУФМ), которые могут быть адаптированы под конкретные условия эксплуатации и имеют улучшенные характеристики по сравнению с традиционными материалами на основе керамики и металлов [1–4]. Основными компонентами УУФМ являются углеродные волокна и матрицы на основе синтетических полимеров, пеков и пиролитического углерода. В зависимости от используемого сырья и технологии изготовления УУФМ могут существенно различаться как по схемам армирования, так и по макро- и микроструктуре матрицы, что позволяет создавать материалы с необходимыми эксплуатационными характеристиками [5, 6]. Процесс производства УУФМ многостадийный, включает ряд технологических этапов, таких как подготовка и совмещение компонентов, формование и высокотемпературные обработки для осуществления процессов карбонизации, уплотнения и графитации [7–10].

Контроль продукции после механической и чистовой обработки является важным этапом производства, который позволяет убедиться, что детали соответствуют требуемым допустимым параметрам дефектности и обладают необходимыми свойствами. Контроль может включать различные методы, в том числе визуальный осмотр, определение размеров, проверку на прочность и др. В зависимости от типа и области применения УУФМ могут использоваться специализированные испытания, такие как испытания на усталость, ударные, гидравлические и т. д.

Дефектами заготовок изделий из УУФМ на разных технологических этапах производства являются пористость, расслоения, трещины, выкрашивания. Внедрение неразрушающего контроля на промежуточных стадиях до финальной механической обработки позволит снизить затраты, вызванные браковкой готовой детали из-за дефектов, вышедших на поверхность и вызвавших отклонение по геометрическим параметрам [11–13].

Материалы и методы

Для деталей, изготовленных из УУФМ, помимо расслоений, характерны специфические дефекты в виде уплотнений, которые сопровождаются «потемнением» на поверхности изделия. Специфика таких дефектов заключается в том, что они не всегда связаны с несплошностью, т. е. потемнения могут быть вызваны особенностью материала. На рис. 1 представлена поверхность изделия с несплошностью, значительная глубина которой подтверждена результатами рентгеновской компьютерной томографии. Данная заготовка не соответствовала требованиям нормативной документации по

величине плотности. На рис. 2 представлена поверхность изделия с «потемнением» без несплошности.

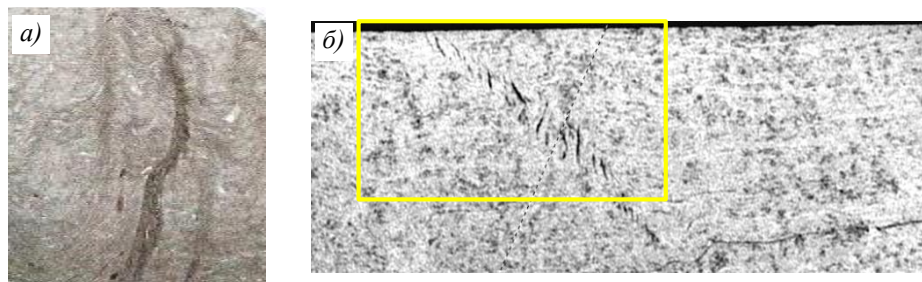


Рис. 1. Несплошность на поверхности изделия (а) и рентгеновская компьютерная томограмма с определением глубины дефекта (б). Цветом выделена область несплошности

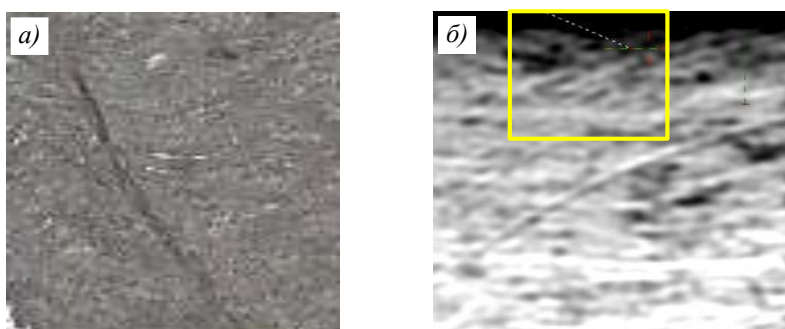


Рис. 2. «Потемнение» на поверхности (а) и рентгеновская компьютерная томограмма, подтверждающая отсутствие несплошности (б). Цветом выделена область «потемнения»

Попадание подобных несплошностей в чистовой контур готовой детали недопустимо, в связи с этим задача оценки их линейной глубины является актуальной. На рис. 3 показан фрагмент образца с несплошностью глубиной t , которую требуется оценить.

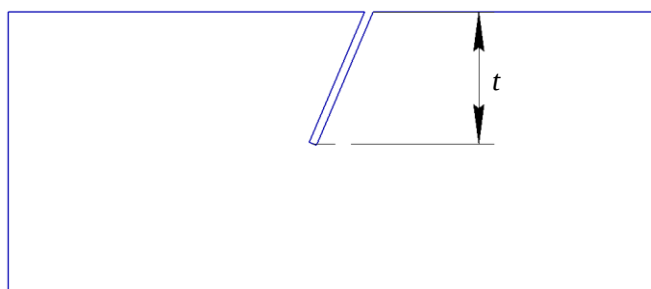


Рис. 3. Фрагмент образца с несплошностью глубиной t , которую требуется оценить

Поскольку УУФМ являются электропроводящими, а подобные дефекты поверхностные, их оценка возможна вихретоковым методом неразрушающего контроля [14].

Вихретоковый метод основывается на использовании электромагнитных полей для обнаружения дефектов и измерения характеристик материала [15, 16]. Приближение вихретокового преобразователя к электропроводящему материалу приводит к возникновению в нем вихревых токов. Наличие дефектов влияет на направление и интенсивность вихревых токов, вызывая изменение напряжения измерительной катушки преобразователя. Данный метод чувствителен к дефектам типа «трещина» и широко применяется для измерения их параметров, в том числе для материалов с низкой электропроводностью.

Дефекты глубиной >10 мм обычно затруднительно оценить с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля, так как глубина проникновения вихревых токов ограничивается электропроводимостью материала σ . Глубину проникновения δ можно определить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_a \sigma f}},$$

где σ – удельная электропроводимость, См/м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; f – частота возбуждающего тока, Гц.

Однако электропроводимость УУФМ мала [17], поэтому оценка дефектов глубиной >10 мм теоретически возможна. В данной работе анализируется возможность применения вихретокового метода неразрушающего контроля для оценки глубины несплошностей, возникающих в УУФМ.

Сигнал, регистрируемый вихретоковым дефектоскопом при перемещении преобразователя над дефектом, зависит от многих факторов: частоты возбуждающего тока, диаметра вихретокового преобразователя, зазора, геометрических параметров и ориентации дефекта относительно преобразователя и т. п. [16–19]. Для анализа возможности оценки глубины дефекта и влияния различных параметров систем контроля разработана конечно-элементная модель распределения электромагнитных полей в зоне контроля [19, 20]. В качестве вихретокового датчика в модели применяли абсолютный трансформаторный накладной преобразователь, дефект (трещина) ориентирован перпендикулярно поверхности образца. Требуемыми свойствами при моделировании являются магнитная проницаемость и электропроводимость материала. УУФМ является немагнитным, электропроводимость фрагмента исследуемого образца оценена с помощью вихретокового метода в диапазоне от 70 до 100 кСм/м в зависимости от участка контроля.

По итогам численного моделирования получены зависимости относительного изменения сигнала вихретокового преобразователя от глубины дефекта. Зависимости построены относительно максимальной глубины дефекта (28 мм). Возможность оценки глубины определяется наклоном зависимости относительного изменения сигнала (производной приращения) от размера дефекта.

На рис. 4 представлены зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта для разных значений частоты возбуждающего тока, а также наклон зависимости, по которому определяется возможность оценки глубины.

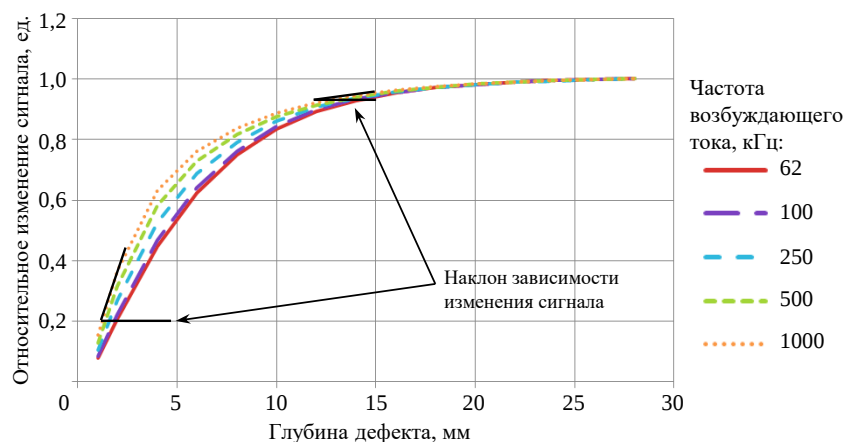


Рис. 4. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта для разных частот возбуждающего тока

При частоте возбуждающего тока 1 МГц и глубине дефекта >15 мм наклон зависимости напряжения существенно сокращается. С уменьшением частоты возбуждающего тока производная приращения напряжения снижается при больших значениях глубины дефекта. Незначительное влияние частоты возбуждающего тока на сигнал вызвано низкой проводимостью материала. В металлах влияние частоты будет значительнее, однако максимально возможная глубина оценки дефекта существенно уменьшится [19]. Проанализировав результаты, представленные на рис. 4, можно сделать вывод, что для оценки дефектов требуется уменьшение частоты. Однако вихретоковые преобразователи с небольшим диаметром работают только в диапазоне высоких частот.

На рис. 5 показаны зависимости относительного изменения сигнала преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц.

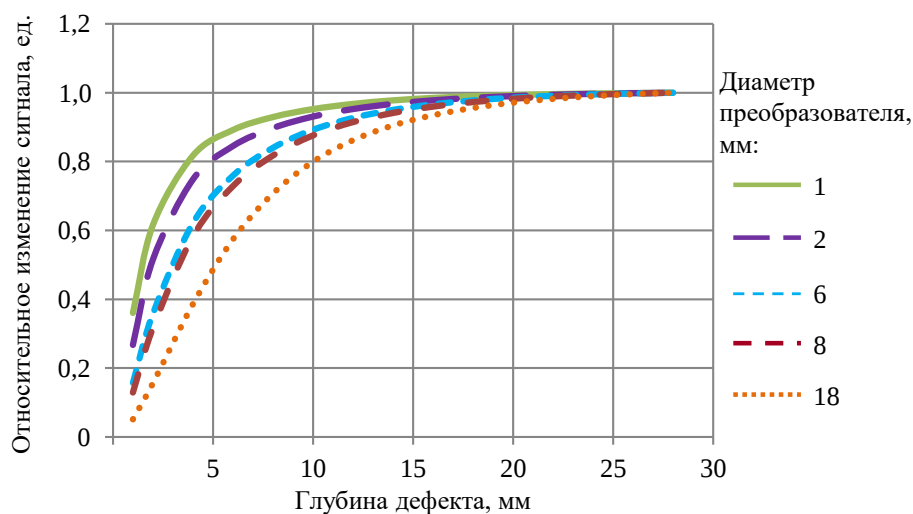


Рис. 5. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц

При оценке глубины дефекта преобразователем диаметром 1 мм производная приращения напряжения снижается при глубине дефекта >5 мм. С увеличением диаметра преобразователя наклон зависимости уменьшается при больших значениях глубины, следовательно, чем больше диаметр преобразователя, тем большую глубину дефекта возможно оценить.

Для объективного анализа влияния частоты возбуждающего тока и диаметра вихретокового преобразователя требуется оценить чувствительность к изменению глубины дефекта. Чувствительность рассчитывали по формуле

$$S = \frac{dU}{dt},$$

где S – чувствительность, ед.; U – относительное изменение сигнала, ед.; t – глубина дефекта, мм.

На рис. 6 показаны зависимости чувствительности преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц.

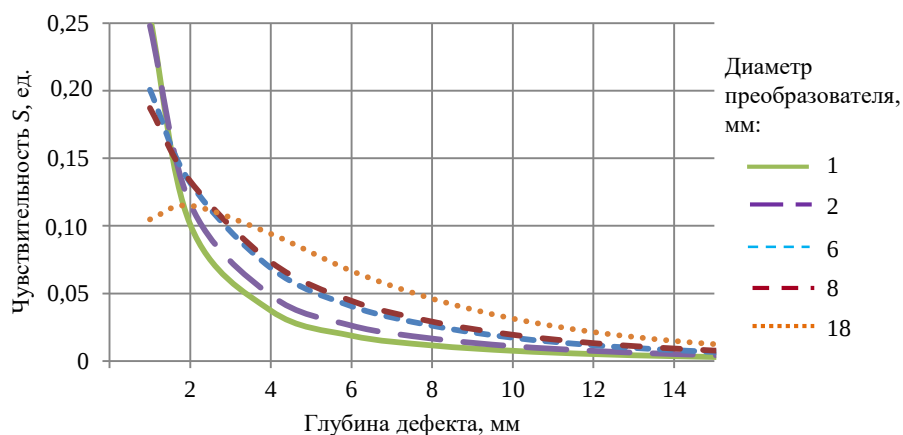


Рис. 6. Зависимости чувствительности преобразователя с разными диаметрами от глубины дефекта при частоте возбуждающего тока 500 кГц

С увеличением диаметра преобразователя повышается чувствительность к оценке более глубоких дефектов, однако уменьшается чувствительность к обнаружению и оценке небольших дефектов. При небольшом диаметре преобразователя увеличивается чувствительность к небольшим дефектам, однако оценка размеров большой глубины становится невозможна.

На рис. 7 показаны зависимости чувствительности преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта при разных частотах возбуждающего тока.

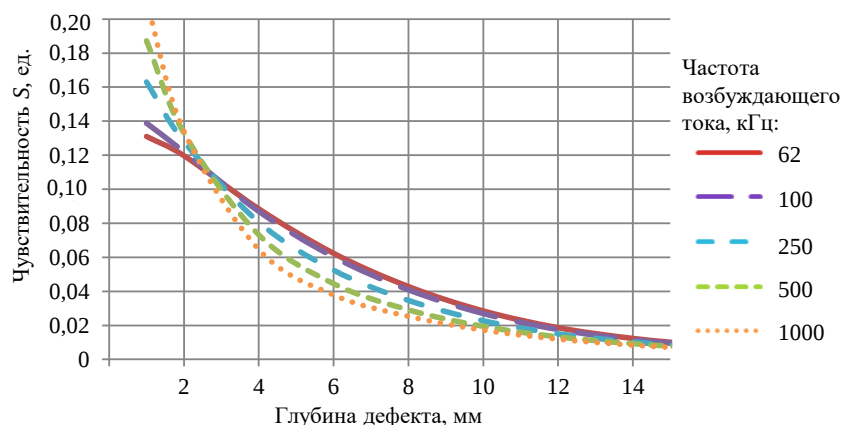


Рис. 7. Зависимости чувствительности преобразователя диаметром 8 мм от глубины дефекта при разных частотах возбуждающего тока

С уменьшением частоты преобразователя увеличивается чувствительность к оценке глубины больших дефектов, однако уменьшается возможность обнаружения и оценки дефектов малых размеров. Обратная картина зафиксирована при увеличении частоты возбуждающего тока: повышается чувствительность к обнаружению и оценке неглубоких дефектов, однако уменьшается чувствительность при оценке крупных дефектов.

Дефекты естественного происхождения отличаются от смоделированных углом наклона γ относительно поверхности образца (естественный дефект показан на рис. 1), что предположительно может сильно изменить сигнал преобразователя и привести к неправильной оценке глубины дефекта. На рис. 8 продемонстрированы угол наклона γ

и линейная глубина дефекта t , которая оценивается в данной работе. Для анализа влияния угла наклона дефекта в модели скорректирован угол γ . Зависимости сигнала преобразователя от угла наклона дефекта представлены на рис. 9. Данные определяли с помощью преобразователя диаметром 8 мм при частоте возбуждающего тока 500 кГц для дефектов линейной глубины 4, 6, 8 и 10 мм относительно дефекта, направленного под углом $\gamma = 90$ градусов.

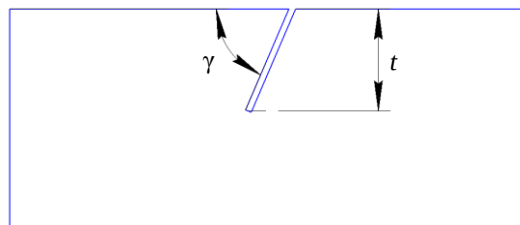


Рис. 8. Угол наклона дефекта γ с линейной глубиной t

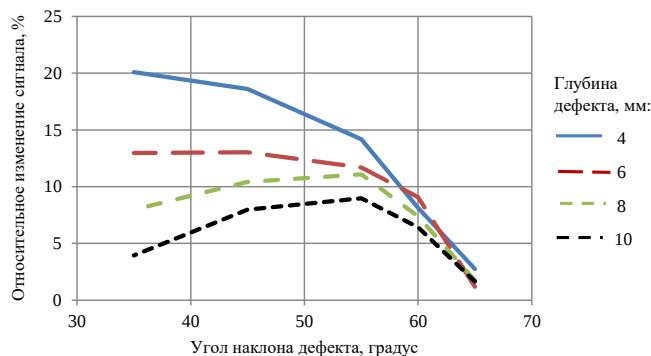


Рис. 9. Зависимости относительного изменения сигнала преобразователя диаметром 8 мм от угла наклона дефектов разной глубины при частоте возбуждающего тока 500 кГц

Сигнал от преобразователя при критическом значении угла наклона $\gamma = 35$ градусов и линейной глубине дефекта $t = 4$ мм изменяется не более чем на 20 % относительно дефекта, перпендикулярного поверхности. При этом с увеличением линейной глубины дефекта этот показатель уменьшается: при глубине дефекта 10 мм максимальное изменение сигнала не превысило 9 % (при $\gamma = 55$ градусов). Таким образом, при расчете глубины естественного дефекта установлено незначительное влияние угла наклона дефекта, что в свою очередь позволяет калибровать показания на образцах-имитаторах с дефектами, перпендикулярными поверхности.

Из результатов моделирования следует:

- удельная электропроводимость УУФМ достаточна для оценки дефектов;
- из-за низкой электропроводимости УУФМ возможна оценка глубины крупных дефектов;
- чем больше диаметр преобразователя, тем больше будет сигнал, по которому возможна оценка глубины дефекта;
- при увеличении частоты возбуждающего тока уменьшается глубина проникновения вихревых токов в материал, в результате повышается чувствительность к выявлению и оценке небольших дефектов, но оценка глубины больших дефектов становится невозможной;
- угол наклона дефекта оказывает незначительное влияние на оценку линейной глубины.

Результаты и обсуждение

Для подтверждения результатов математического моделирования при оценке глубины дефектов в УУФМ проведены испытания на образце-имитаторе, выполненном из УУФМ, с дефектами разной глубины. Искусственные дефекты № 1–4 выполнены в форме пропила глубиной 5, 10, 15 и 20 мм соответственно, раскрытие не превышает 0,4 мм (рис. 10).

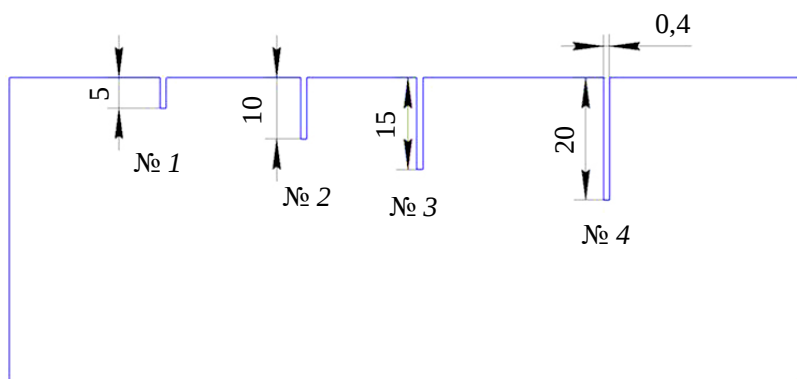


Рис. 10. Искусственные дефекты № 1–4 разной глубины

Опробование проводили с использованием вихретокового преобразователя диаметром 5 мм. После отстройки от мешающих факторов [20] выполнено сканирование участков с пропилами, результаты которого представлены на рис. 11.

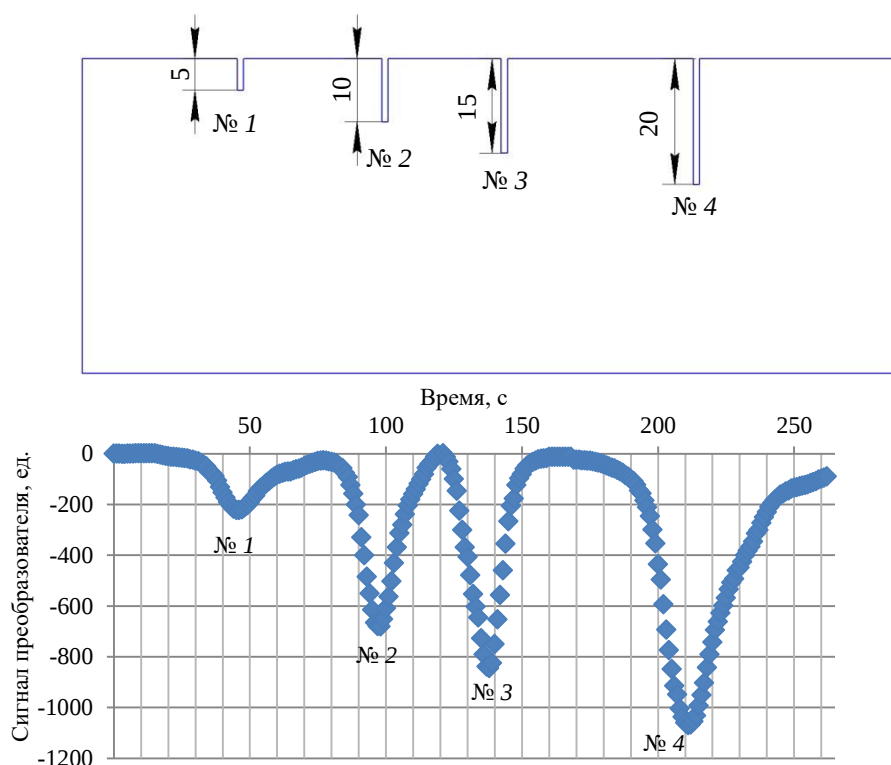


Рис. 11. Результаты сканирования участков с пропилами № 1–4 преобразователем диаметром 5 мм

На рис. 12 представлена зависимость максимума огибающей сигнала, полученной при прохождении преобразователя над пропилом, от глубины дефекта. Применение преобразователя диаметром 5 мм позволяет получить сигналы, по которым можно определить глубину дефекта.

На рис. 13 представлены результаты сканирования образца-имитатора дефектов преобразователем диаметром 0,5 мм (зависимость сигнала преобразователя от времени прохождения над пропилом).

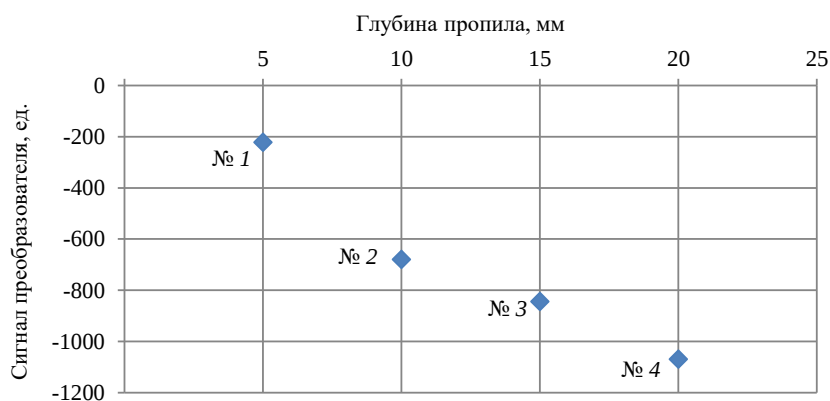


Рис. 12. Зависимость максимума сигнала преобразователя диаметром 5 мм от глубины пропилов № 1–4

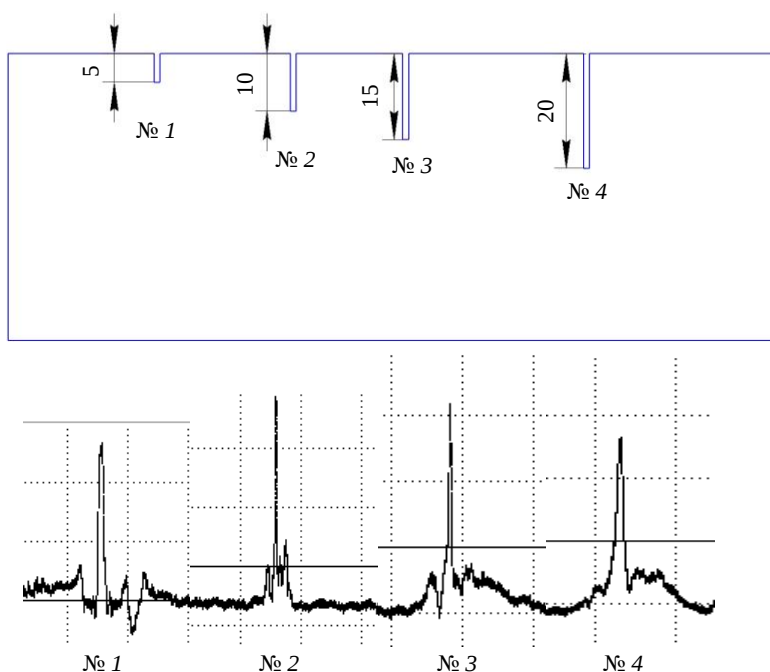


Рис. 13. Результаты сканирования участков с пропилами № 1–4 преобразователем диаметром 0,5 мм

Перемещение преобразователя диаметром 0,5 мм над дефектом также приводит к резкому изменению сигнала, который обозначает обнаружение дефекта, но величина максимального отклонения не зависит от размера пропила. Аналогичный результат получен при использовании преобразователя диаметром 1 мм.

При проведении испытаний с применением преобразователя диаметром 5 мм выявлено, что приближение к краю образца на расстояние ~10 мм влияет на сигнал, из-за искажений которого могут возникнуть проблемы с точностью определения глубины. Это означает, что при проведении испытаний требуется применение автоматических систем контроля.

Заключения

Разработана конечно-элементная модель абсолютного трансформаторного накладного вихретокового преобразователя для анализа влияния параметров контроля (диаметр преобразователя, частота возбуждающего тока) и геометрических параметров (глубина, ориентация относительно поверхности) дефекта типа «трещина».

На основе результатов математического моделирования и испытаний на образце-имитаторе показана принципиальная возможность оценки глубины дефекта, возникающего в УУФМ, с помощью вихретокового метода неразрушающего контроля. Установлено, что для оценки глубоких дефектов рекомендуется использовать преобразователи большого диаметра (>6 мм) при низкой частоте возбуждающего тока (<100 кГц в зависимости от типа датчика). В свою очередь, при обнаружении неглубоких дефектов чувствительность будет выше у датчиков небольшого диаметра (<2 мм) при высокой частоте возбуждающего тока (>1 МГц в зависимости от типа датчика). Полученные результаты также справедливы для оценки дефектов типа «трещина».

Проанализирована чувствительность к дефектам различной глубины для разных вариаций диаметров преобразователя и частоты возбуждающего тока. Установлено незначительное влияние угла наклона дефекта на оценку его линейной глубины.

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

Список источников

1. Кулаков В.В., Голубков А.К., Кириллова Л.Н. Выявление факторов повышенного износа фрикционных углерод-углеродных материалов на режимах рулений самолетов // Трение и износ. 2024. Т. 45. № 1. С. 59–67.
2. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
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: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4(65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
7. Кенигфест А.М., Крамаренко Е.И., Кулаков В.В. и др. Углерод-углеродные фрикционные материалы для тормозных систем автомобильной и другой современной техники // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 5. С. 32–34.
8. Кулаков В.В., Шмелев Д.С., Иванова А.Н., Голубков А.К. Особенности конструирования углерод-углеродных композитов фрикционного назначения, изготовленных аэродинамическим методом, на основе дискретных волокон // Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Т. 27. № 2. С. 261–271.
9. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.
10. Сидорина А.И. Тканые металлоуглеродные армирующие наполнители для ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.

11. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., Virnedkar S.S. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications // *Frontiers in Materials*. 2024. Vol. 11. P. 1–21.
12. Scarponi C. Carbon-carbon composites in aerospace engineering // *Advanced Composite Materials Aerospace Engineering* / eds. S. Rana, R. Fanguero. Woodhead Publishing, Elsevier, 2016. P. 385–412. DOI: 10.1016/b978-0-08-100037-3.
13. Charitidis J.P. Theoretical Review for Non-Destructive Techniques of Composite Materials // *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*. 2024. Vol. 9. Is. 2. P. 127–136.
14. James R., Haider M., Giurgiutiu V., Lilienthal D. A simulative and experimental approach toward eddy current nondestructive evaluation of manufacturing flaws and operational damage in CFRP composite // *Nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems*. 2019. Vol. 3. P. 1–14.
15. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Изд. дом «Спектр», 2010. 256 с.
16. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль: практ. пособие в 5 кн. / под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая школа, 1992. Кн. 3: Электромагнитный контроль. 312 с.
17. Шкатов П.Н., Ермолаев А.А., Хвостов А.А. Повышение эффективности вихретокового контроля углепластиковых объектов путем увеличения чувствительности к ориентации углеродных волокон // *Приборы*. 2022. № 4 (262). С. 10–15.
18. Bowler J.R., Theodoulidis T.P., Poulakis N. Eddy current probe signals due to a crack at a right-angled corner // *IEEE Transactions on magnetics*. 2012. Vol. 45. P. 4735–4746.
19. Шитиков В.С., Кодак Н.П., Головков А.Н., Кудинов И.И. Применение вихретокового метода контроля при изготовлении образцов с искусственными дефектами // *Электрометаллургия*. 2023. № 2. С. 23–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-23-31.
20. Шитиков В.С., Кодак Н.П., Головков А.Н., Кудинов И.И. Анализ особенностей контроля деталей из титановых и жаропрочных сплавов вихретоковым методом на наличие трещин // *Электрометаллургия*. 2020. № 8. С. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.

References

1. Kulakov V.V., Golubkov A.K., Kirillova L.N. Identification of factors of increased wear of friction carbon-carbon materials in aircraft taxiing modes. *Treniye i iznos*, 2024, vol. 45, no. 1, pp. 59–67.
2. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
3. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
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 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
6. Chertishchev V.Yu. The estimation of the probability of defects detection by the acoustic methods, depending on their size in constructions from PCM for output control data in the form of binary. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
7. Kenigfest A.M., Kramarenko E.I., Kulakov V.V. et al. Carbon-carbon friction materials for brake systems of automobiles and other modern equipment. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmax*, 2008, no. 5, pp. 32–34.

8. Kulakov V.V., Shmelev D.S., Ivanova A.N., Golubkov A.K. Design features of carbon-carbon composites for friction purposes, manufactured by the aerodynamic method, based on discrete fibers. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 261–271.
9. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials. *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 24–42.
10. Sidorina A.I. Woven metal-carbon reinforcing fillers for PCM. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
11. Agarwal N., Rangamani A., Bhavsar K., Virnedkar S.S. An overview of carbon-carbon composite materials and their applications. *Frontiers in Materials*, 2024, vol. 11, pp. 1–21.
12. Scarponi C. Carbon-carbon composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials Aerospace Engineering*. Eds. S. Rana, R. Fanguero. Woodhead Publishing, Elsevier, 2016, pp. 385–412. DOI: 10.1016/b978-0-08-100037-3.
13. Charitidis J.P. Theoretical Review for Non-Destructive Techniques of Composite Materials. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 2024, vol. 9, is. 2, pp. 127–136.
14. James R., Haider M., Giurgiutiu V., Lilienthal D. A simulative and experimental approach toward eddy current nondestructive evaluation of manufacturing flaws and operational damage in CFRP composite. *Nondestructive evaluation, diagnostics and prognostics of engineering systems*, 2019, vol. 3, pp. 1–14.
15. Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. *Methods and devices of electromagnetic control*. Ed. V.E. Shaternikov. Moscow: Spectr, 2010, 256 p.
16. Gerasimov V.G., Pokrovsky A.D., Sukhorukov V.V. *Non-destructive testing: a practical guide in 5 books*. Ed. V.V. Sukhorukov. Moscow: Vysshaya shkola, 1992, book 3: Electromagnetic testing, 312 p.
17. Shkatov P.N., Ermolaev A.A., Khvostov A.A. Improving the efficiency of eddy current testing of carbon-fiber objects by increasing sensitivity to the orientation of carbon fibers. *Pribery*, 2022, no. 4 (262), pp. 10–15.
18. Bowler J.R., Theodoulidis T.P., Poulakis N. Eddy current probe signals due to a crack at a right-angled corner. *IEEE Transactions on magnetics*, 2012, vol. 45, pp. 4735–4746.
19. Shitikov V.S., Kodak N.P., Golovkov A.N., Kudinov I.I. Application of the eddy current testing method in the manufacture of samples with artificial defects. *Elektrometallurgiya*, 2023, no. 2, pp. 23–31. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-2-23-31.
20. Shitikov V.S., Kodak N.P., Golovkov A.N., Kudinov I.I. Analysis of the features of testing parts made of titanium and heat-resistant alloys for cracks by the eddy current method. *Elektrometallurgiya*, 2020, no. 8, pp. 20–29. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-8-20-29.

Информация об авторах

Пичугин Сергей Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлева Светлана Ивановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кулаков Валерий Васильевич, заместитель главного конструктора, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Измайлов Михаил Андреевич, инженер-технолог 3 категории, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Королев Александр Павлович, начальник лаборатории, ПАО АК «Рубин», info@acrubin.ru

Information about the authors

Sergey S. Pichugin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana I. Yakovleva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valery V. Kulakov, Deputy Chief Design, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Mikhail A. Izmailov, Third Category Engineer-Technologist, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Alexander P. Korolev, Head of Laboratory, PJSC «Rubin Aviation Corporation», info@acrubin.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.02.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 04.02.2025.

Научная статья

УДК 614.841.345:629.7.042.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120

О ГОРЕНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ИХ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ

С.Л. Барботько¹

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

Аннотация. Титан имеет высокую температуру плавления, низкую плотность и высокие механические характеристики, поэтому находит широкое применение в аэрокосмической технике. Проанализированы характеристики пожарной опасности титана, актуальность проведенных работ и экспериментальные методы оценки. Установлено, что отсутствуют стандартизованные методы испытаний на пожаробезопасность, вследствие этого полученные результаты несопоставимы. Рассмотрены основные требования, которым должен соответствовать испытательный стенд, предназначенный для оценки пожарной опасности образцов, выполненных из титановых сплавов.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, пожарная опасность, горение, методы испытания, испытательное оборудование

Для цитирования: Барботько С.Л. О горении титановых сплавов и методах оценки их пожарной опасности // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120.

Scientific article

ABOUT COMBUSTION OF TITANIUM ALLOYS AND METHODS OF ASSESSMENT OF THEIR FIRE HAZARD

S.L. Barbotko¹

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

Abstract. Titanium has high melting point, low density and high mechanical properties, therefore it finds broad application in space engineering. The fire hazard characteristics of titanium, relevance of performed works and experimental methods of assessment are analyzed. It is established that there are no standardized test methods on fire hazard for samples of titanium alloys, as a result the obtained results are incomparable. The main requirements to which there has to correspond the test stand intended for assessment of fire hazard of samples made of titanium alloys are analyzed.

Keywords: titanium, titanium alloys, fire hazard, combustion, test methods, test equipment

For citation: Barbotko S.L. About combustion of titanium alloys and methods of assessment of their fire hazard. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-110-120.

Введение

В настоящее время титановые сплавы благодаря их высоким удельным прочностным характеристикам и относительно высокой термостойкости находят широкое применение в промышленности для изготовления конструкций различного назначения. Однако периодически регистрируются случаи воспламенения титановых деталей, приводящие к развитию высокоинтенсивного (с высокой температурой горения) пожара, при котором основным окисляемым компонентом (топливом) является именно титан – происходит возникновение и развитие так называемого «титанового пожара». В связи с вышеизложенным представляет интерес проанализировать имеющиеся сведения по случаям возникновения титановых пожаров, горению образцов титана и его сплавов, оценить их пожарную опасность и определить наиболее перспективные методы испытаний, обеспечивающие возможность получения данных, позволяющих как сопоставлять различные составы между собой, так и оценивать пожаробезопасность деталей в предполагаемых условиях эксплуатации.

Работа выполнена в рамках реализации научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов и неразрушающий контроль» комплексной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1–3]) и при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Анализ пожарно-технических характеристик титана

Основополагающие исследования по процессам окисления и горения титана выполнены во время его внедрения как конструкционного материала в аэрокосмическую технику, т. е. в 60–80 гг. XX в.

Титан имеет температуру плавления 1650–1800 °С, сравнительно низкую плотность (4,5 г/см³) и высокие удельные механические свойства [4–6], вследствие чего применяется в качестве конструкционного материала в авиационной и космической отраслях. В авиационной отрасли сплавы на основе титана находят широкое применение для изготовления элементов шасси, деталей двигателей, огнепреграждающих перегородок, внешней обшивки фюзеляжа, рулевых и несущих поверхностей крыла.

Однако титан также обладает высокой химической активностью – является пирофорным горючим, вследствие чего интенсивно реагирует как с различными традиционными (кислород, галогены) окислителями, так и с веществами и соединениями, обычно не рассматриваемыми в качестве окислителей, такими как угарный и углекислый газы, вода, сероводород, водород, азот и другие химические соединения, способные являться акцепторами электронов, в том числе газы и жидкости, традиционно используемые для тушения пожара (фреоны, хладоны) [7]. По удельной теплоте сгорания титан входит в первую пятерку металлов, выделяющих при окислении наибольшее количество тепла, таких как бериллий, литий, алюминий, магний и титан [8]. Вследствие большой теплоты сгорания титана (теплота образования TiO₂ (рутила) составляет 225,6 ккал/моль) и высокой скорости процесса, температура при горении титана на воздухе составляет >3000 °С, что превышает температуру водородно-кислородного пламени (2800 °С) [4, 9].

Первичный процесс окисления титана происходит уже при обычных (комнатных) условиях (температура окружающей среды 20 °С, давление 1 ат (0,1 МПа), концентрация кислорода в воздухе 21 %), однако дальнейшему активному окислению препятствует образование на поверхности материала плотной пленки из оксидов, препятствующей дальнейшему доступу кислорода. Быстрое образование большой площади

чистой (ювенильной) поверхности (например, в случае разрушения образца или трения), особенно в условиях повышенных температур и атмосферного давления, приводит к высокоинтенсивному окислению и выделению большого количества тепла, обеспечивающего резкий рост температуры. Вследствие высоких температур резко возрастают скорости диффузии кислорода в окалине и из окалины к фронту реакции, а также непосредственно скорость самой реакции окисления.

Высокая температура плавления титана обусловила возможность его применения в теплонапряженных условиях – для изготовления деталей компрессора авиационных двигателей или обшивок внешнего контура сверхзвуковых самолетов и ракетной техники. Однако высокая реакционная способность титана изначально вызывала опасения по поводу его значительной пожарной опасности. Так, например, в начале 1960-х гг. в США действовала программа по созданию пассажирского сверхзвукового самолета SST (supersonic transport), предназначенного для полетов со скоростью до 2,7 Маха. Внешний корпус этого самолета планировалось выполнить целиком из титановых сплавов, но были опасения, что в случае авиационных происшествий, сопровождающихся возникновением пожара, может загореться титан, произойдет разрушение корпуса и выживание людей станет невозможным. Однако проведенные натурные огневые испытания отсека фюзеляжа показали, что даже в условиях высокоинтенсивного пожара от разлившегося углеводородного топлива возгорания титана не происходит, а во внутренних отсеках сохраняется температура, обеспечивающая выживание людей [10, 11].

После этих испытаний для защиты от пожара в пожароопасных зонах стали активно применять в качестве огнепреграждающих перегородок листы из титановых сплавов. Согласно AMC 25.1181 Designated fire zones [12], для изготовления огнепреграждающих перегородок (файберволов) используют листы из нержавеющей стали толщиной не менее 0,4 мм, стальные листы с антикоррозионным покрытием толщиной не менее 0,45 мм или листы из титановых сплавов толщиной не менее 0,45 мм.

Анализ авиационных происшествий с наличием титанового пожара

Для выяснения важности и актуальности данной проблемы и оценки необходимости постановки НИР по воспламеняемости титановых сплавов и титановым пожарам проведен поиск в открытой печати научно-технических литературных источников. Проанализированы также данные Авиационного регистра Международного авиационного комитета (АР МАК) за период с 1992 по 2024 г. и отдела пожарной безопасности Технического центра Федеральной авиационной администрации (ТС FAA) США с 1960 по 2024 г.

По результатам выполненного АР МАК анализа авиационных происшествий и катастроф с гражданской авиационной техникой за период с 1992 по 2024 г. титановый пожар в причинах не указан. Однако возгорание титана вследствие разрушения лопаток компрессора авиационного двигателя или трения титана о бетонное покрытие при поломке шасси событие достаточно распространенное. Например, пожар самолета Fokker 100 вследствие поломки шасси, произошедший в Тегеране 19 марта 2019 г., или возгорание двигателя самолета Ту-204, летевшего по маршруту «Уфа – Сочи» 22 августа 2018 г., а также возгорание двигателя самолета Boeing B-737 при аварийной посадке 1 сентября 2018 г. в аэропорту Сочи. В упомянутых случаях искрообразование и горение титана – это скорее источники воспламенения, приводящие к горению углеводородного топлива, нежели к непосредственно титановому пожару. В Росавиации все же считают, что причиной отказа двигателя Ту-204 во время полета стал титановый пожар [13]. Согласно той же публикации, титановый пожар в двигателе стал причиной катастрофы самолета Ту-154 под Красноярском.

Анализ основных направлений зарубежных работ по испытаниям титана на пожаробезопасность

В статье [14] проанализированы основные направления работ, выполняемых зарубежными исследователями, по повышению пожарной безопасности современной авиационной техники. Однако работы по испытаниям титановых сплавов среди них отсутствуют. Более чем из 1000 документов, находящихся в открытом доступе на сайте отдела пожарной безопасности Технического центра Федеральной авиационной администрации (ТС FAA) США, всего только шесть документов связаны с одновременно встречающимися словами «титан» и «огонь». При этом четыре документа относятся к оценке эффективности титана в качестве огнепреграждающих перегородок и подтверждению способности сдерживать мощный внешний пожар от разлившегося топлива. Только два документа посвящены оценке воспламеняемости титана, используемого в компрессоре авиационных двигателей [9, 15].

В этих работах отмечается следующее: титановые пожары в двигателях явление чрезвычайно редкое, в двигателях гражданских самолетов эти пожары вообще не отмечены вследствие «мягкого» режима эксплуатации, в военных двигателях они случаются, как правило, вследствие напряженных режимов маневрирования. Рассматриваются аспекты причин возникновения титанового пожара, его характеристики и методы предупреждения. Воспламенение титана в двигателе (компрессоре) происходит, как правило, вследствие следующих причин:

- трение титановой лопатки об обечайку;
- попадание твердого предмета в компрессор, вызывающее местный перегрев вследствие трения.

Первая причина вызвана ошибками при конструировании двигателя – малые зазоры, недостаточная жесткость обечайки, неудачная конструкция уплотнений.

Даже при наличии второй причины воспламенение происходит не всегда и определяется условиями теплоотвода – скоростью воздушного потока, геометрической формой пера лопатки. При больших скоростях воздушного потока неконтролируемого горения не происходит, так как осуществляется охлаждение местного перегрева, а также сдув и распыление расплавленного металла.

Во время полета для тушения загоревшегося двигателя применяется его выключение, температура и давление воздуха снижаются, вследствие этого, как правило, происходит прекращение горения титана. Для тушения горящего титана можно применять воздушную среду с 60 % аргона. Использование углекислого газа или хладона (фреон) неэффективно, они могут только интенсифицировать горение. Однако в случае разрушения топливо- и маслопроводов и загорания горючих жидкостей применение хладонов необходимо для тушения углеводородного пожара в мотогондоле.

Неконтролируемое горение можно предотвратить путем грамотного конструирования (например, достаточно толстое перо лопатки обеспечивает необходимый теплоотвод) или применения специальных термостойких покрытий, предотвращающих воспламенение пера лопатки или обечайки при попадании капель раскаленного расплава. В этих условиях происходит самопроизвольное погасание воспламенившегося участка детали из титана.

Анализ отечественной и зарубежных нормативных баз, а также иных научно-технических литературных источников по методам испытаний образцов из титановых сплавов на пожаробезопасность

Одно из направлений повышения безопасности авиационных двигателей – применение сплавов с улучшенными характеристиками по пожаробезопасности.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводятся разработка и квалификация новых титановых сплавов [16–21], при этом необходимо проводить испытания по определению критических условий их воспламеняемости.

Проанализированы базы отечественных (ГОСТ и ГОСТ Р – система NORMA CS) и зарубежных стандартов (база Американского общества испытаний и материалов – ASTM, международных стандартов – ISO).

Проведенный анализ отечественных и зарубежных нормативных документов не выявил ни одного стандарта на метод оценки воспламеняемости титановых сплавов. В авиационной отрасли применяется большой комплекс методов для оценки пожаробезопасности материалов, в том числе магниевых сплавов [22]. Однако метод оценки пожарной безопасности титана в них отсутствует. В работе [23] выполнен анализ пожароопасных зон и приведены применяемые методы испытаний. В статье [24] представлена методика оценки огнестойкости огнезащитных перегородок из титана. Однако эти методы не позволяют оценивать воспламеняемость образцов из титановых сплавов.

Для оценки воспламеняемости титана и его сплавов отечественные и зарубежные исследователи применяли различные самостоятельно разработанные методики.

Так, в работе [5] для оценки пожаробезопасности титановых сплавов разработано несколько различных вариантов методик испытаний. Например, оценена способность сплавов воспламеняться при воздействии трения при различных температурах окружающей среды (рис. 1). Однако эти испытания отличаются от условий работы материалов в двигателях по атмосферному давлению воздуха или кислорода, форме образцов, условиям трения, поэтому можно получить не совсем корректные результаты.

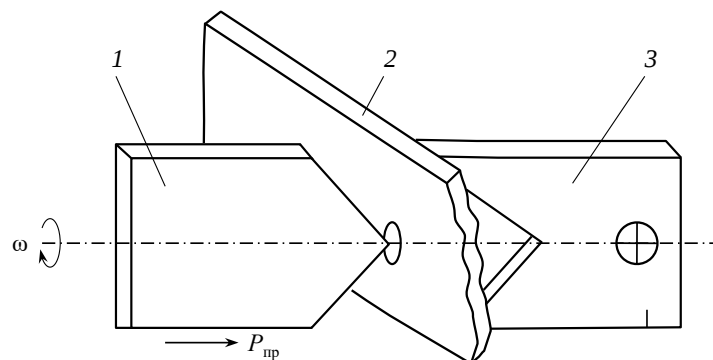


Рис. 1. Схема испытательного оборудования для оценки воспламеняемости титановых сплавов под воздействием нагрева за счет трения [5]: 1 – клин; 2 – пластина; 3 – упор (ω – скорость вращения; $P_{пр}$ – усилие прижатия)

В работах [9, 15] использована специально сконструированная установка в виде трубы (рис. 2), в которую подается сжатый и нагретый до нужной температуры воздух, а образец испытываемой титановой лопатки поджигается при помощи различных устройств, в том числе капель расплава, а также электрической дугой или лазерным излучением. Отмечено, что при горении титана создается высокая температура ($>3300\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. выше, чем при электродуговой сварке) и высокоинтенсивный ультрафиолетовый поток (более чем в 5 раз интенсивнее, чем при горении магния). Высокие температуры и интенсивное УФ-излучение способны вывести из строя экспериментальное оборудование – вызвать прогар корпуса испытательного стенда, возможен также выход из строя матрицы видеорегистрирующей аппаратуры.

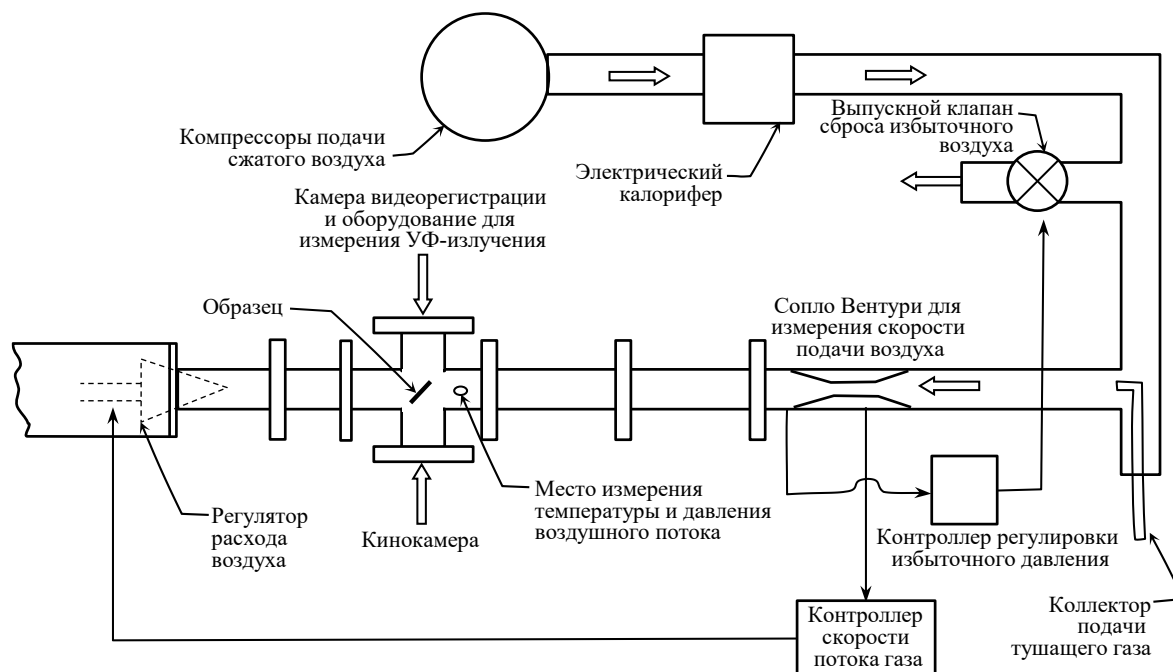


Рис. 2. Схема испытательного оборудования, имитирующего условия работы титановой лопатки в компрессоре авиационного двигателя [9]

В работе, выполненной в Национальном бюро стандартов США (NBS, в настоящее время – NIST), использован комплекс различных методик: по оценке окислительной способности, воспламеняемости, статическому и динамическому горению образцов из титановых сплавов при различных температурах, давлении, скорости воздушного потока и угле атаки [25]. На рис. 3 приведена схема испытательной установки для оценки воспламеняемости образцов титановых сплавов под действием лазерного излучения.

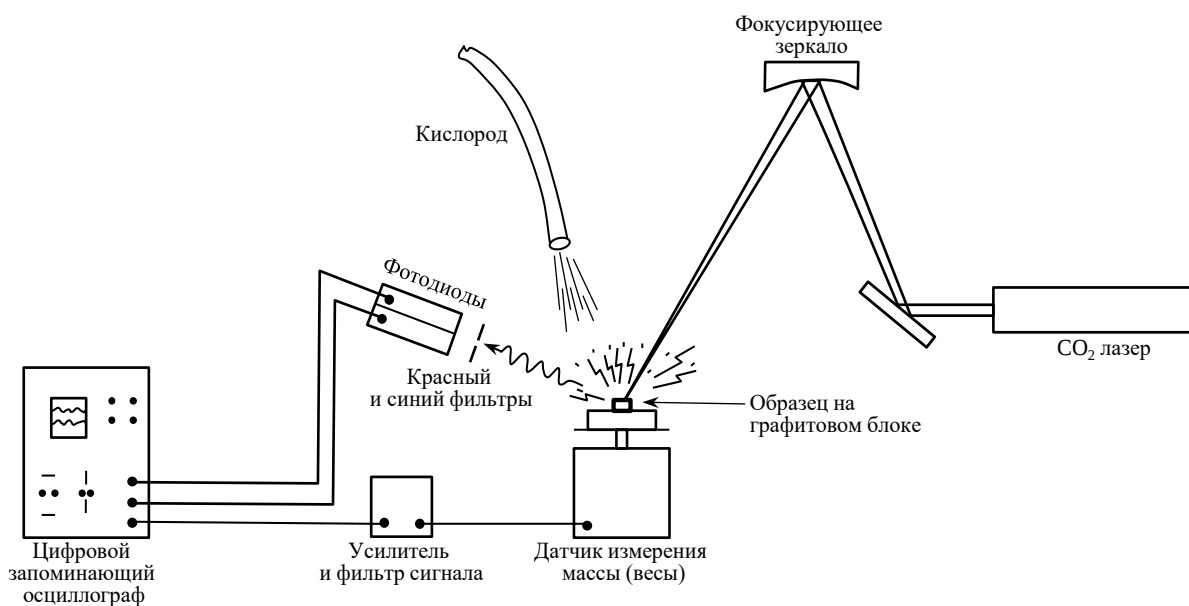


Рис. 3. Схема испытательного оборудования для исследования влияния химического состава титанового сплава на воспламеняемость при воздействии лазерного излучения [25]

Имеется ряд отечественных публикаций по исследованию горения порошков и пластин из титановых сплавов, например в работах [26–29]. Большой литературный научно-технический обзор отечественных и зарубежных исследований приведен в статье [30].

К сожалению, в большинстве случаев полученные результаты носят сравнительный характер и существенно меняются в зависимости от использованной методики испытания.

Установлено, что на условия воспламенения образцов титана влияет ряд факторов: химический состав сплава, температура плавления, размер и форма образцов, давление и содержание кислорода в атмосфере, условия обдува. В целом процесс воспламенения титана соответствует классической теории теплового взрыва – горение реализуется тогда, когда интенсивность выделения тепла превышает скорость теплоотвода. Но кроме тепловых условий воспламенения большое значение оказывают толщина и состояние оксидной или иной поверхностной (защитной) пленки.

В связи с этим эффективным способом предотвращения воспламенения титановых сплавов является наличие силикатного или иного защитного покрытия [31, 32].

Вторым по эффективности способом предотвращения воспламенения или обеспечения самостоятельного затухания элементов, выполненных из титановых сплавов, является использование такой формы образцов, чтобы обеспечивался интенсивный теплоотвод и минимальный контакт с раскаленным телом [9, 15].

Третий способ повышения пожаробезопасности изделий из титановых сплавов – изменение химического состава титанового сплава, т. е. увеличение содержания алюминия, циркония, меди и др. легирующих элементов [25].

Заключения

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- пожары вследствие воспламенения титана в серийных двигателях крайне редко приводят к потере гражданской авиационной техники;
- проблемы воспламенения титановых деталей в компрессоре авиационного двигателя и неконтролируемого горения титана, приводящего к выходу из строя двигателя, обусловлены в первую очередь ошибками при конструировании двигателя, которые должны устраняться на этапах разработки и доводки конструкции. Дополнительно рекомендуется применять защитные покрытия, обеспечивающие наличие оксидной пленки на поверхности, предотвращающей диффузию металла к поверхности;
- непосредственно титан и титановые сплавы стойки к воздействию огня до температуры плавления (1650 °C) вследствие наличия на поверхности плотной пленки из рутила (диоксида титана). Поэтому титан и его сплавы широко применяются в качестве огнепреграждающих перегородок, работающих до температуры 1500 °C и предотвращающих распространение огня, например, от углеводородного пожара. Воспламенение титана и его сплавов происходит при значительном перегреве (близком или выше температуры плавления) и быстром удалении оксидной пленки – образовании ювенильной поверхности;
- отсутствует узаконенная нормативная база по проведению испытаний титановых сплавов на воспламеняемость;
- в случае принятия решения о необходимости создания отечественной испытательной базы для проведения огневых испытаний образцов из титановых сплавов, необходимо проведение проектных конструкторских работ по созданию стенда, на котором должны имитироваться реальные условия работы образцов. Для образцов из титановых сплавов, предназначенных для изготовления лопаток компрессора авиационного

двигателя, – это следующие условия: повышенные давление воздуха и скорость воздушного потока заданной температуры; возможность установки образцов под различными углами атаки и различной формы; специальная система видеорегистрации, устойчивая к УФ-излучению; система пожаротушения и предотвращения поджига близкорасположенных объектов.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
4. Перельман В.И. Краткий справочник химика. М.: Гос. н.-т. изд-во хим. лит., 1951. 676 с.
5. *Авиационные материалы и технологии* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. Вып.: Горение и пожаробезопасность титановых сплавов / Е.А. Борисова, Н.М. Сляров. 80 с.
6. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Изотова А.Ю., Новак А.В. Пожаробезопасные титановые сплавы и особенности их применения // *Титан*. 2012. № 4 (38). С. 42–46.
7. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. Окисление титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1970. 320 с.
8. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. 294 с.
9. Fox D.G. Investigation of Titanium Combustion Characteristics and Suppression Techniques: Report AFAPL-TR-75-73 Air Force Aero-Propulsion Laboratory. 1976. 66 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0350.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
10. Sarkos C.P. Titanium Fuselage Environmental Conditions in Post-Crash Fires: Technical Report FAA-RD-71-3 (FAA-NA-71-2). FAA, US. 1971. 74 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-3.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
11. Sarkos C.P. Small-scale fire tests of high-temperature cabin pressure sealant and insulating materials: Report FAA-RD-71-67. Federal Aviation Administration. National Aviation Facilities Experimental Center, 1971. 35 p. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-67.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
12. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 28. 1515 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (дата обращения: 02.12.2024).
13. Титановый пожар: Росавиация назвала причины отказа двигателя Ту-204 в полете // *Вести.ru*. URL: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=3052737> (дата обращения: 02.12.2024).
14. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Анализ основных направлений исследований, выполняемых зарубежными организациями, занимающимися пожарной безопасностью авиационной техники и материалов авиационно-космического назначения (обзор) // *Проблемы безопасности полетов*. 2018. № 2. С. 3–35.
15. Uihlein T., Schlegel H. Titanium Fire In Jet Engines. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
16. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-186-194.
17. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ*. 2015. № 10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.12.2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.

18. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2013-0193-2021-0-1-61-70.
19. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Опыт ВИАМ в области разработки и исследования экономнолегированных титановых сплавов нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2016. № 9 (45). Ст. 05 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 2.12.2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
20. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Заводов А.В. Предпосылки разработки нового малолегированного технологичного титанового сплава средней прочности с рабочей температурой до 400–450 °С, способного к упрочнению // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
21. Путырский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов BT1-0 и BT4 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
22. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния, методы испытаний, перспективы развития, методические особенности / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 424 с.
23. Барботько С.Л., Кириенко О.А., Вольный О.С., Луценко А.Н. Анализ пожарной опасности мотогондол авиационных двигателей и других пожароопасных зон; используемые методы огневых испытаний материалов и конструктивных элементов на соответствие требованиям авиационных норм // *Проблемы безопасности полетов*. 2017. № 5. С. 3–24.
24. Барботько С.Л., Вольный О.С., Вешкин Е.А., Гончаров В.А. Оценка огнестойкости материалов и конструктивных элементов для авиационной техники // *Авиационная промышленность*. 2018. № 2. С. 63–67.
25. Stobridge Th.R., Moulder J.C., Clark A.F. Titanium Combustion in turbine Engines: Report FAA-RD-79-51. NBSIR 79-1616, NBS. 1979. 137 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir79-1616.pdf> (дата обращения: 02.12.2024).
26. Черненко Е.В., Грива В.А., Розенбанд В.И. Исследование закономерностей воспламеняемости титановых порошков // *Физика горения и взрыва*. 1982. Т. 18. № 5. С. 20–26.
27. Бахман Н.Н., Кузнецов Г.П., Пучков В.М. Горение пластин титана // *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36. № 4. С. 60–65.
28. Bolobov V.I. Mechanism of Self-Ignition of Titanium Alloys in Oxygen // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2002. Vol. 38. No. 6. P. 639–645.
29. Белоусова Н.С., Глотов О.Г., Гуськов А.В. Исследование горения частиц титана // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2017. Т. 1. С. 276–278.
30. Глотов О.Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189. № 2. С. 135–171. DOI: 10.3367/UFGN.2018.04.038349.
31. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si–β-стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
32. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Григоренко В.Б., Козлов И.А. Изменения свойств поверхности титанового сплава BT20 при химическом удалении эксплуатационных углеродсодержащих загрязнений // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 2.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Materials for Aerospace Engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
3. Kablov E.N. Quality Control of Materials – a Guarantee of Safe Operation of Aviation Equipment. *Aviatsionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
4. Perelman V.I. *Brief Handbook of a Chemist*. Moscow: State Sci. Publ. House of Chemical Literature, 1951. 676 p.
5. *Aviation Materials and Technologies*. Ed. by E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2007, is.: Combustion and Fire Safety of Titanium Alloys, 80 p.
6. Nochovnaya N.A., Alekseev E.B., Izotova A.Yu., Novak A.V. Fire-safe titanium alloys and features of their application. *Titan*, 2012, no. 4 (38), pp. 42–46.
7. Bai A.S., Lainer D.I., Slesareva E.N., Tsyplin M.I. *Oxidation of titanium and its alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 320 p.
8. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S., Korotkov A.I. *Combustion of powdered metals in active environments*. Moscow: Nauka, 1972, 294 p.
9. Fox D.G. *Investigation of Titanium Combustion Characteristics and Suppression Techniques*: Report AFAPL-TR-75-73 Air Force Aero-Propulsion Laboratory, 1976, 66 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0350.pdf> (accessed: December 02, 2024).
10. Sarkos C.P. *Titanium Fuselage Environmental Conditions in Post-Crash Fires*: Technical Report FAA-RD-71-3 (FAA-NA-71-2). FAA, US, 1971, 74 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-3.pdf> (accessed: December 02, 2024).
11. Sarkos C.P. *Small-scale fire tests of high-temperature cabin pressure sealant and insulating materials*: Report FAA-RD-71-67. Federal Aviation Administration. National Aviation Facilities Experimental Center, 1971. 35 p. Available at: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/rd71-67.pdf> (accessed: December 02, 2024).
12. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes*. CS-25. Amendment 28. 1515 p. Available at: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes#cs-25-large-aeroplanes> (accessed: December 02, 2024).
13. *Titanium fire: Rosaviatsia named the reasons for the Tu-204 engine failure in flight*. Available at: <http://www.vesti.ru/doc.html?id=3052737> (accessed: December 02, 2024).
14. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyeenko O.A., Shurkova E.N. Analysis of the main areas of research carried out by foreign organizations involved in fire safety of aviation equipment and aerospace materials (review). *Problemy bezopasnosti poletov*, 2018, no. 2, pp. 3–35.
15. Uihlein T., Schlegel H. *Titanium Fire In Jet Engines*. Available at: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf> (accessed: December 02, 2024).
16. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-S-186-194.
17. Arislanov A.A., Goncharova L.J., Nochovnaya N.A., Goncharov V.A. Prospects for the use of titanium alloys in laminated composite materials. *Trudy VIAM*, 2015, no. 10, paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
18. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2013-0193-2021-0-1-61-70.

19. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S., Bokov K.A. VIAM experience in the field of development and research of economically alloyed titanium alloys of new generation. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-5-5.
20. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Zavodov A.V. Prerequisites for the development of new low-alloyed technological medium strength titanium alloy with operating temperature up to 400–450 °C, capable of strengthening. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
21. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
22. Barbotko S.L., Volny O.S., Kiriyeenko O.A., Shurkova E.N. *Fire safety assessment of polymeric materials for aviation purposes: analysis of the state, test methods, development prospects, methodological features*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2018, 424 p.
23. Barbotko S.L., Kiriyeenko O.A., Volny O.S., Lutsenko A.N. Fire hazard analysis of aircraft engine nacelles and other fire hazardous areas; fire testing methods used for materials and structural elements for compliance with aviation standards. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2017, no. 5, pp. 3–24.
24. Barbotko S.L., Volny O.S., Veshkin E.A., Goncharov V.A. Assessment of fire resistance of materials and structural elements for aviation equipment. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2018, no. 2, pp. 63–67.
25. Stobridge Th.R., Moulder J.C., Clark A.F. *Titanium Combustion in turbine Engines*: Report FAA-RD-79-51. NBSIR 79-1616, NBS, 1979, 137 p. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir79-1616.pdf> (accessed: December 02, 2024).
26. Chernenko E.V., Griva V.A., Rozenband V.I. Study of the flammability patterns of titanium powders. *Fizika goreniya i vzryva*, 1982, vol. 18, no. 5, pp. 20–26.
27. Bakhman N.N., Kuznetsov G.P., Puchkov V.M. Combustion of titanium plates. *Fizika goreniya i vzryva*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 60–65.
28. Bolobov V.I. Mechanism of Self-Ignition of Titanium Alloys in Oxygen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 639–645.
29. Belousova N.S., Glotov O.G., Guskov A.V. Study of titanium particle combustion. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2017, vol. 1, pp. 276–278.
30. Glotov O.G. Ignition and combustion of titanium particles. Experimental research methods and results. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2019, vol. 189, no. 2, pp. 135–171. DOI: 10.3367/UFNr.2018.04.038349.
31. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha+\beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
32. Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu., Grigorenko V.B., Kozlov I.A. Changes in the surface properties of titanium alloy VT20 in the chemical removal of operational carbon pollution. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-5-5.

Информация об авторах

Барботько Сергей Львович, начальник сектора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey L. Barbotko, Head of the Sector, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 05.02.2025.
The article was submitted 27.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 05.02.2025.



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

ПЕРВЫЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА



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

до **10 000** шт. в год

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

до **190 000** кг в год

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

ПРЕИМУЩЕСТВА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ:

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



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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



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

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

Производственные мощности

до **800** кг покрытий
в год

ХАРАКТЕРИСТИКИ:

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



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

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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

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



Производственные мощности

до **2500** кг паст
в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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

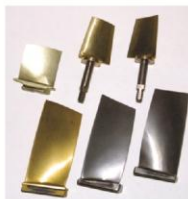


ЖАРОСТОЙКИЕ, ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ, ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

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

ПРОИЗВОДСТВО РАСХОДНЫХ
МАТЕРИАЛОВ: КАТОДЫ И МИШЕНИ.

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



Цилиндрический
металлический катод



Вакуумная ионно-плазменная установка
МАП-3



Установка среднечастотного магнетронного
напыления УОКС-3

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

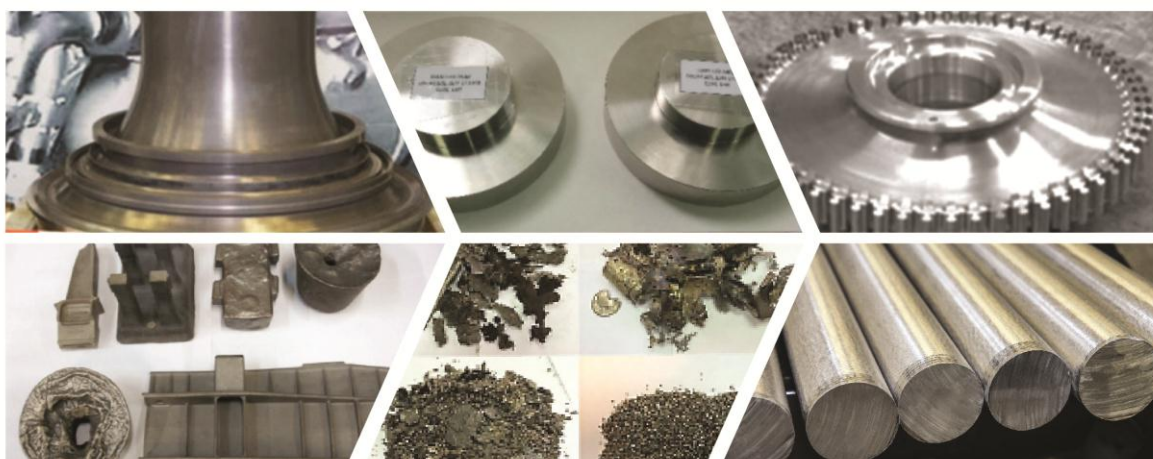
на правах рекламы

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



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

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



ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ ПОЗВОЛИТ:

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

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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



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

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

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



Осуществляется серийная поставка заготовок дисков

более **2500** шт. в год



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

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



ЗАЩИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ:

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

Производственные мощности

более **30** марок покрытий
в год

до **40 000** кг в год

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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



МАГНИЕВЫЕ И ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО НАБОРА

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



Производственные
мощности

35 000 кг магниевого
литья в год

35 000 кг алюминиевого
литья в год

10 000 кг противопригарной присадки
в год



Освоен полный технологический цикл изготовления отливок.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

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

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

на правах рекламы

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

В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ СОЗДАНА СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДГОТОВКИ ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА:

- совершенствование механизмов привлечения и закрепления в науке талантливой молодежи;
- повышение качества подготовки кадров высшей квалификации;
- повышение квалификации руководителей и специалистов по программам дополнительного профессионального образования;
- профессиональное обучение рабочих.



70%
практика

Занятия ведутся в рамках стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки по принципу втуз

30%
теория

Базовая кафедра:



Совместные научно-исследовательские лаборатории:



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY



Федеральный исследовательский
Центр «Физико-технический институт
имени И.О.Скрябина»



Подготовка
кадров
с 2013 года:

>20

программ дополнительного профессионального образования

60

выпускников получили диплом магистра

>700

школьников посетили институт

>50

защит кандидатских диссертаций

>1500

человек прошли курсы повышения квалификации

>250

предприятий



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