

№12
(154)
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

№ 12 (154) декабрь 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» – ЦНИИ КМ «Прометей»)

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

Полимерные материалы

Гусева М.А. Практическое использование реологического метода для определения условий производственного контроля и режимов отверждения при разработке полимерных связующих

Салахова Р.К., Вешкин Е.А., Апалькова А.В., Смиргина Н.Д. Исследование отвержденных расплавных клеевых эпоксидных связующих методами склеро- и микротвердомерии

Композиционные материалы

Баранников А.А., Вешкин Е.А., Шершак П.В., Галиуллин Ан.Р. Панели пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов современного отечественного самолета. Часть 1. Разнообразие требований отечественных разработчиков воздушных судов к панелям пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов

Копылов А.В., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносое А.О., Славин А.В. Исследование характеристик полимерного заполнителя холодного отверждения ВПЗ-25 для заполнения сотовых панелей элементов авиационной техники

Викулин В.В., Гвоздев С.С. Особенности получения высокотермостойкого малоусадочного материала на основе химически упрочненного карбида кремния

Потапов М.В., Бузенков А.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Магниты с высокой температурной стабильностью для навигации

CONTENTS

Polymer materials

Guseva M.A. Practical use of the rheological method in determining the conditions of production control and curing modes in the development of polymer binders

Salakhova R.K., Veshkin E.A., Apalkova A.V., Simirgina N.D. Study of cured hot melt adhesive epoxy binders by sclero- and microhardness methods

Composite materials

Barannikov A.A., Veshkin E.A., Shershak P.V., Galiullin An.R. Floor panels of the cabin and baggage and cargo compartment from polymer composite materials for modern domestic aircraft. Part 1. Diversity of requirements of domestic aircraft developers for cabin and baggage and cargo compartment floor panels from polymer composite materials

Kopylov A.V., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Studying the characteristics of VPZ-25 cold-curing polymer filler and developing a technology for filling honeycomb panels for aircraft components

Vikulin V.V., Gvozdev S.S. Features of obtaining a highly heat-resistant low shrinkage material based on chemically strengthened silicon carbide

Potapov M.V., Buzenkov A.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Magnets with high temperature stability for navigation

Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Грачева А.Д., Сабуров Ф.А., Ткачук А.И., Седов Е.В., Шеббо М.Ф.М. Разработка угле- и стекло-препрегов, перерабатываемых вакуумным формованием, с пониженной температурой отверждения для изготовления средств реабилитации инвалидов 74 **Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Gracheva A.D., Saburov F.A., Tkachuk A.I., Sedov E.V., Shebbo M.F.M.** Development of carbon and glass prepreg processed by vacuum molding with low curing temperature for the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled

Иванов Д.Д., Губин А.М. Повреждение углепластиков после низкоэнергетического удара: обзор механизма разрушения и влияния эксплуатационных условий 88 **Ivanov D.D., Gubin A.M.** Damage of carbon fiber reinforced polymer after low-energy impact: a review of failure mechanism and influence of operating conditions

Мараховский П.С., Кычкин А.А., Скуридина Н.С., Кычкин А.К., Габышев А.А. Исследование старения базальтопластиковой арматуры в условиях умеренно теплого и очень холодного климата после 10 лет экспозиции на открытых площадках 101 **Marakhovskiy P.S., Kychkin A.A., Skuridina N.S., Kychkin A.K., Gabyshev A.A.** Basalt-plastic rod aging investigation in moderately warm and very cold climates after 10 years of exposure in open areas

Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаяев А.Ю., Вахрушева Я.А., Путилина П.М. Исследования свойств высокопрочного углеродного волокна со стандартным модулем упругости производства КНР 115 **Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Vahrusheva Ya.A., Putilina P.M.** Investigation of the properties of high-strength standard modulus carbon fiber produced in China

Защитные и функциональные покрытия

Protective and functional coatings

Софронова Д.А., Ярошевская В.Н., Кольцова М.А., Лонский С.Л., Князев А.В., Куршев Е.В. Влияние состава порошковой смеси и продолжительности термообработки на свойства термодиффузионного алюминий-цинкового покрытия 126 **Sofronova D.A., Yaroshevskaya V.N., Koltsova M.A., Lonskii S.L., Knyazev A.V., Kurshev E.V.** The implication of powder mixture composition and heat treatment duration on the properties of thermal diffusion aluminium-zinc coating

Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Щербаклова А.В., Лапшин И.Г., Губайдуллин И.М. Разработка метода количественной оценки повреждения лакокрасочных покрытий с использованием компьютерного распознавания изображений 137 **Laptev A.B., Matishov G.G., Shcherbakova A.V., Lapshin I.G., Gubaidullin I.M.** Development of a method for quantitative assessment of paint coatings damage using computer image recognition

Испытания материалов

Material tests

Рыжков П.В., Горбовец М.А. Применение энергетического критерия для оценки усталостной долговечности никелевого сплава, полученного селективным лазерным плавлением 149 **Ryzhkov P.V., Gorbovets M.A.** Application of energy criterion to evaluate fatigue life of nickel alloy obtained by selective laser melting

Иваньков Р.Р., Сидорина А.И., Котомин С.В. Определение прочности адгезионной связи между российскими углеродными волокнами и эпоксидной матрицей методом вытягивания из «узла» 170 **Ivankov R.R., Sidorina A.I., Kotomin S.V.** Determination of the strength of the adhesive bond between Russian carbon fibers and an epoxy matrix using the «loop» pull-out test

Научная статья

УДК 678.8:532.135

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ И РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

М.А. Гусева¹

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

Аннотация. С точки зрения реологии состав полимерного связующего на этапе разработки основывается на выборе вязкости при различных температурах и продолжительности термического воздействия. Для определения вязкости полимерного связующего в основном используют реологические методы испытаний, которые реализуются с применением реологического оборудования различных марок и с разной конфигурацией измерительных систем. Показаны практическое использование реологического оборудования различных марок при контрольном анализе, возможности ротационной и осцилляционной реометрии для определения режимов отверждения связующего в препрегах.

Ключевые слова: реология, производственный контроль, отверждение, разработка, связующие, полимерные композиционные материалы

Для цитирования: Гусева М.А. Практическое использование реологического метода для определения условий производственного контроля и режимов отверждения при разработке полимерных связующих // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11.

Scientific article

PRACTICAL USE OF THE RHEOLOGICAL METHOD IN DETERMINING THE CONDITIONS OF PRODUCTION CONTROL AND CURING MODES IN THE DEVELOPMENT OF POLYMER BINDERS

М.А. Guseva¹

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

Abstract. At the development stage, the composition of a polymer binder from the rheological point of view is based on the choice of viscosity at different temperatures and the duration of exposure to temperature. The main methods to determine the viscosity value of a polymer binder are rheological testing methods, implemented using rheological equipment of various brands, and measuring systems of different configurations. The study shows practical use of rheological equipment of various brands in control analysis, possibilities of rotational and oscillatory rheometry for determining binder curing modes in prepregs.

Keyword: rheology, production control, curing, development, binding, polymeric composite materials

For citation: Guseva M.A. Practical use of the rheological method in determining the conditions of production control and curing modes in the development of polymer binders. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-3-11.

Введение

На этапе разработки полимерного связующего важным фактором является реологическое поведение, к которому предъявляют определенные требования. В частности, оценивают значения динамической и комплексной вязкости, которые можно использовать при моделировании поведения полимерных композиционных материалов (ПКМ) при рабочих режимах на этапе разработки. Большое количество свойств полимерных материалов в готовых изделиях зависит от условий переработки – внешний вид, механические и эксплуатационные характеристики и др. С реологической точки зрения оптимизация состава полимерного связующего основывается на выборе значения вязкости при различных температурах и продолжительности термического воздействия для определенной технологии переработки, которая накладывает ограничения на реологические параметры, определяя технологичность материала. Такие испытания позволяют выбрать оптимальные параметры изготовления ПКМ [1–5].

Основным методом определения вязкости полимерного связующего является ротационная вискозиметрия. Данный метод реализуется главным образом на вискозиметрах Брукфильда различных марок и с разной конфигурацией измерительных систем, наиболее распространенных в лабораториях, где занимаются разработкой полимерных связующих, либо на аналогичных приборах других марок. В ротационных приборах измерительный шпindel приводится в движение двигателем через пружину, степень деформации пружины (угол поворота) измеряется датчиком и выводится на дисплей. При определении вязкости гидравлическое сопротивление испытываемой жидкости пропорционально скорости вращения шпинделя и зависит от его диаметра. Диапазон измерения вязкости достигается за счет многоскоростной трансмиссии и взаимозаменяемых шпинделей.

В отличие от стандартных ротационных вискозиметров, реометры имеют более сложную конструкцию и позволяют решать более широкий круг задач. Их устройство позволяет работать не только с полимерными жидкостями с низкой вязкостью, но и с материалами с высокой твердостью, а также изменять условия испытаний в широком диапазоне, варьируя скорость сдвига, температуру, режим эксперимента (ротационный или осцилляционный), конфигурацию измерительных систем.

По сравнению с ротационным режимом осцилляционный применяется реже, однако позволяет расширить возможности реологических испытаний, оценить не только время гелеобразования, деформационные процессы, но и диапазоны температур размягчения и плавления твердых полимерных соединений при входном анализе исходных компонентов. В данном режиме измерительная система совершает не вращательные вокруг своей оси, а колебательные движения с заданной частотой и амплитудой. Измерения в этом режиме дают информацию о реологических характеристиках образца благодаря возможности выделить упругую (модуль накоплений) и вязкую (модуль потерь) составляющие.

Для анализа влияния реологических характеристик полимера на режим его переработки проводят исследования в сканирующем (динамическом) режиме. В изотермическом режиме определяют жизнеспособность, время отверждения или разрушения образца при высоких температурах. Время гелеобразования позволяет оценить срок годности связующего, длительность сохранения технологических и физико-механических характеристик [6–10].

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

Материалы и методы

В качестве экспериментальных образцов использовали эпоксидное связующее, разработанное в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для препреговой технологии получения. Реологические испытания образцов проводили на ротационном вискозиметре с условным обозначением Пр1 по ГОСТ 25276–82 «Полимеры. Метод определения вязкости ротационным вискозиметром при определенной скорости сдвига» и на реометре с условным обозначением Пр2 по ГОСТ Р 57950–2017 «Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении».

Результаты и обсуждение

На этапе разработки, когда определен основной компонентный состав полимерного связующего, проводятся статистические эксперименты для внесения итоговых результатов в разрабатываемую научно-техническую документацию. Оцениваются в том числе значения вязкости при различных температурах испытаний для выбора условий проведения выходного контроля на производстве. Испытания осуществляются либо в широком диапазоне сдвиговых характеристик, либо с применением различных измерительных конфигураций используемого реологического оборудования.

В данной работе подобные испытания проводили на ротационном вискозиметре Пр1 с конфигурацией «конус/плита» и реометре Пр2 с конфигурацией «плита/плита». Основными отличиями этих двух приборов являются не только конфигурации измерительных систем, но и способ поддержания температуры испытаний в течение заданного времени. Кроме того, вискозиметр Пр1 предназначен для работы с высоковязкими полимерными связующими, и даже при начальных настройках минимальное значение скорости сдвига составляет $50\text{--}60\text{ с}^{-1}$. В отличие от вискозиметра, реометр Пр2 снабжен плотными дверцами и автоматической системой для однородного прогрева образца по всему объему, а технические возможности позволяют реометру работать в широком диапазоне скоростей сдвига (от $0,01$ до 1000 с^{-1}) [1, 11–14].

Предварительные эксперименты проводили на вискозиметре Пр1 для установления рабочего диапазона скоростей сдвига и выбора измерительного шпинделя из имеющихся в комплекте к прибору. Для определения условий выходного анализа исследуемого эпоксидного связующего осуществляли изотермическую выдержку пробы в контрольной точке $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин со скоростью вращения шпинделя 5 мин^{-1} . Данную температуру выбрали экспериментальным путем, опираясь на внешний вид отвержденных образцов и результаты испытаний термического анализа неотвержденного связующего. При сравнении полученных значений вязкости неньютоновских жидкостей необходимо использовать одно и то же сочетание скорости вращения и вида шпинделя при всех измерениях, даже если точность одного из них при этом заметно снижается, хотя рекомендуемое значение крутящего момента должно находиться в пределах от 10 до 90 %. Результаты проведенных испытаний приведены в таблице. На основании этих данных выбрана контрольная точка в диапазоне значений вязкости от 2 до 5 Па·с при скорости сдвига 80 с^{-1} .

Результаты определения вязкости образца экспериментального эпоксидного связующего на вискозиметре Пр1 при различной скорости сдвига

Скорость сдвига, с^{-1}	Вязкость, Па·с	Крутящий момент, %
52	4,0–4,2	5–7
82	2,9–3,1	11–12
108	2,7–3,3	23–24

Затем проводили сравнительные динамические испытания на реометре Пр2 для определения более точных значений технологических параметров для внесения в научно-техническую документацию. На рис. 1 представлены реологические кривые образца эпоксидного связующего, полученного в сканирующем режиме испытаний в диапазоне температур 50–150 °С с постоянной скоростью нагрева 2 °С/мин и со скоростями сдвига 80 и 0,2 с⁻¹. Установлено, что значение скорости сдвига значительно влияет на поведение связующего, особенно при температурах 100–120 °С, а значения вязкости в контрольной точке отличаются в 2 раза.

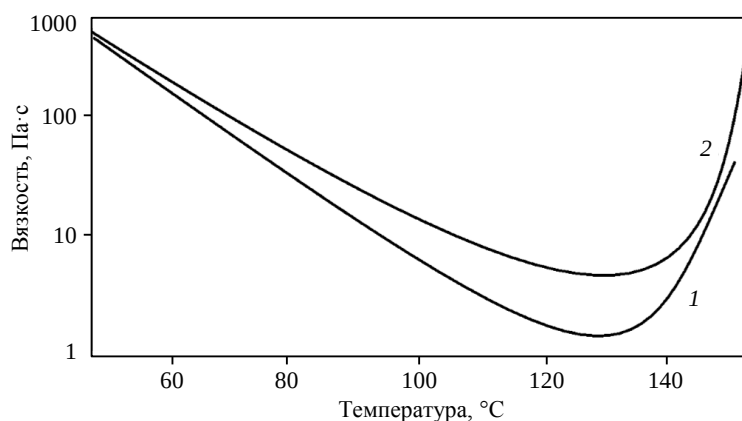


Рис. 1. Реологические зависимости в динамическом режиме испытаний образца эпоксидного связующего при скорости сдвига 80 (1) и 0,2 с⁻¹ (2)

Аналогичное влияние деформации на разницу значений вязкости наблюдали при изотермической выдержке при температуре ниже контрольной (рис. 2). При малом значении скорости сдвига 0,2 с⁻¹, в отличие от высокого уровня 80 с⁻¹, полимерному связующему как многокомпонентной системе достаточно времени для достижения равновесного состояния. С технологической точки зрения можно предположить, что сдвиг ассоциируется с физическим воздействием на связующее при выбранном методе переработки, а значит, можно оценить влияние деформации и приложенной нагрузки на условия, при которых происходит превращение полимерной композиции в конечный материал [13–15].

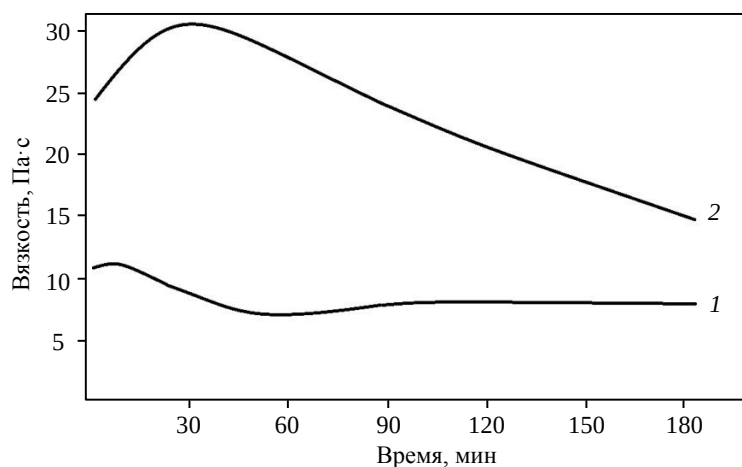


Рис. 2. Реологические зависимости в изотермическом режиме испытаний образца эпоксидного связующего при температуре 80 °С и скорости сдвига 80 (1) и 0,2 с⁻¹ (2)

На основе полученных данных предположили, что в процессе разработки экспериментального состава реологические испытания можно проводить на реологическом оборудовании различных марок, при этом общим параметром будет значение скорости сдвига как константы реологического поведения полимера. Такой подход позволит нивелировать влияние деформации, действующей на образец при испытаниях, и использования различных конфигураций измерительных систем.

Следующий шаг исследований полимерной композиции – выбор режима отверждения. Поскольку в основном переработка полимеров в ПКМ происходит при термическом воздействии, реологические зависимости вязкости от температуры позволяют понять поведение разрабатываемой композиции в таких условиях. На рис. 3 схематично показан вид реологических кривых с чередующимися этапами динамического и изотермического нагрева (при температурах T_1 и T_2). Такой подход позволяет оценить поведение связующего в процессе отверждения, подобрать температуры и длительность ступенчатого нагрева для достижения максимальной конверсии [12, 13].

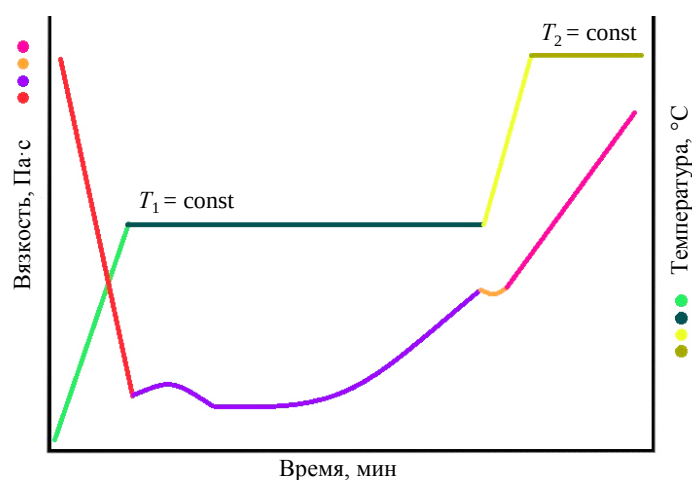


Рис. 3. Схематическое изображение реологических кривых при выборе условий режима отверждения

При получении препрега на начальной стадии технологического процесса полимерное связующее может подвергаться воздействию температуры в диапазоне от 40 до 100 °C. Поэтому для проведения дальнейших исследований осуществляли термообработку экспериментальных составов по режиму: 2 ч при 40 °C, 30 мин при 70 °C, 10 мин при 100 °C. Как показали результаты определения вязкости, подобная пробоподготовка не оказала влияния на свойства полимерного связующего. На основании результатов дифференциальной сканирующей калориметрии и рекомендаций разработчика исследуемого эпоксидного связующего проведены испытания при пяти режимах отверждения. На рис. 4 представлены зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь от времени для каждого из выбранных режимов 1–5.

Упругая составляющая G' (модуль накоплений) характеризует энергию деформации и отражает поведение исследуемой системы как твердого тела. Вязкая составляющая G'' (модуль потерь) определяет диссипацию энергии, т. е. сопротивление деформированию, характеризуя поведение системы как жидкости. Отношение этих модулей – тангенс угла механических потерь $\tan \delta$. В настоящее время определение температурных зависимостей этих параметров стало наиболее практичным методом исследования поведения полимерных систем в процессе отверждения. Как показано в работах [7, 13, 14], кривая температурной зависимости тангенса угла механических потерь позволяет фиксировать

физические и релаксационные процессы, характеризующиеся появлением максимумов на реологических кривых. Температурный интервал, при котором наблюдаются характерные пики, соответствует переходам полимеров в различные фазовые состояния и хорошо коррелирует с данными, полученными другими термомеханическими методами.

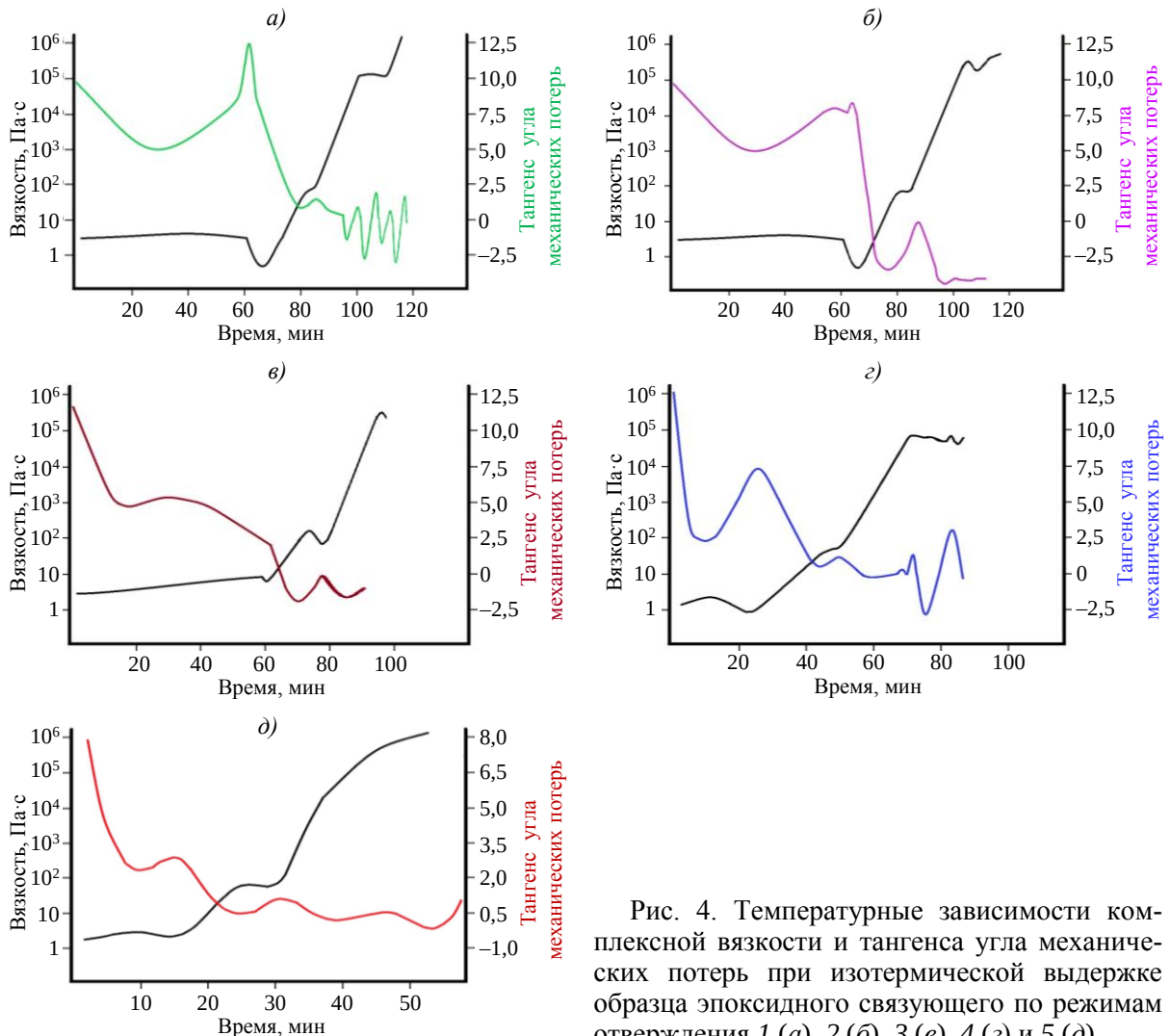


Рис. 4. Температурные зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь при изотермической выдержке образца эпоксидного связующего по режимам отверждения 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г) и 5 (д)

Для режимов отверждения 1–3 (рис. 4, а–в) значение комплексной вязкости в течение 40–60 мин от начала испытаний находится в диапазоне 2–8 Па·с. При этом если для режимов 1 и 2 кривые тангенса угла механических потерь имеют схожий вид, указывающий на происходящие процессы с выделением тепла через 50 мин от начала выдержки (значение вязкости остается в диапазоне 4–6 Па·с), то по режиму 3 изменение внутренней структуры связующего начинается уже через 30 мин (вязкость начинает возрастать с 3 до 10 Па·с).

Для режима 4 (рис. 4, г) на первой стадии отверждения тангенс угла механических потерь на зависимости от времени имеет более выраженный максимум, который соответствует времени 30 мин от начала испытаний. Значение вязкости в диапазоне времени 30–60 мин увеличивается в 5–7 раз, что указывает на протекание реакции

отверждения. Можно предположить, что при этой температуре происходят процессы перестройки внутренней структуры связующего, аналогичные процессам при режиме 3, только с большей скоростью.

Для режима 5 (рис. 4, д) в первые 10 мин вязкость находится на уровне 2–5 Па·с, однако уже через 15 мин от начала испытаний показатель увеличивается, а через 23–25 мин – резко возрастает, что свидетельствует о протекании процесса отверждения связующего с высокой скоростью. Через 50 мин кривая вязкости практически выравнивается – связующее отверждено. Пики на кривой тангенса угла механических потерь указывают, в какой момент происходят процесс сшивки, сопровождающийся максимальными тепловыми эффектами и, вероятно, завершение перестройки макромолекул полимерной композиции внутри системы.

Кроме того, при сравнении временных зависимостей для режимов отверждения 4 и 5 (рис. 5) видно, что профили кривых вязкости практически совпадают, а кривые тангенса угла механических потерь имеют одновременные максимумы, но с различной интенсивностью, т. е. в этот момент происходят аналогичные процессы, но с разными тепловыми выделениями и, соответственно, с разными скоростями.

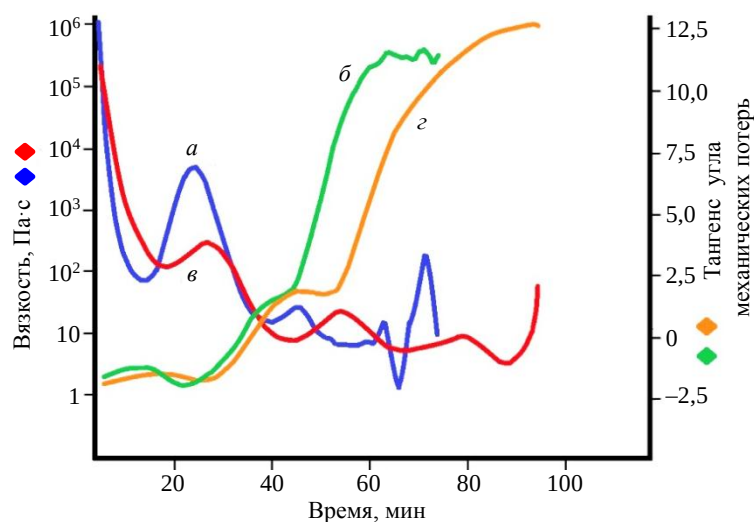


Рис. 5. Температурные зависимости комплексной вязкости и тангенса угла механических потерь при изотермической выдержке образца эпоксидного связующего по режимам отверждения 4 (а, б) и 5 (в, г)

Заключения

Представленная последовательность проведения реологических испытаний описывает порядок определения условий выходного контроля разрабатываемого связующего. Сравнительный анализ реологических кривых при изотермической выдержке при температурах технологического процесса позволяет оценить поведение разрабатываемого связующего при термообработке и провести корректировку технологических режимов отверждения.

На основании результатов проведенных экспериментов технологам даны практические рекомендации по выбору режима получения препрегов на основе разрабатываемого эпоксидного связующего.

Список источников

1. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.

2. Северс Э.Т. Реология полимеров. М.: Химия, 1966. 200 с.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС, 2003. 312 с.
4. Гусева М.А., Петрова А.П. Возможности реологии при исследовании связующих для ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. № 7. С. 38–45.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
6. 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: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
7. Гусева М.А., Прокопова Л.А., Хасков М.А. Определение температур плавления твердых полимеров реологическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 7. С. 38–43.
8. Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
9. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2012. 180 с.
10. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Мельников А.А., Павленко С.А., Гусева М.А., Пыхтин А.А., Ларионов С.А. Исследование влияния теплового режима FDM-печати на структурирование и коробление образцов полиэтилена // Труды ВИАМ. 2021. № 7 (101). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
11. Морозова В.С., Иванов М.С., Шестаков А.М., Павлюкович Н.Г. Влияние текучести расплава полиэфирэфиркетона на характеристики углепластика на его основе // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-44-51.
12. Кузнецова П.А., Ткачук А.И., Любимова А.С., Эльдяева Г.Б. Характеристики расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-62 для изготовления высоконагруженных деталей конструкционного значения инъекционными методами // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.
13. Гусева М.А., Ибрагимов З.Д. Выбор отверждающей системы при разработке эпоксидных композиций с энергоэффективным режимом отверждения // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.
14. Гусева М.А. Применение методов реологии в разработке полимерных связующих и производственном контроле // Сб. мат. XXXI Симпозиума по реологии. М.: ИНХС РАН, 2024. С. 87.
15. Гусева М.А. Реологический подход при разработке полимерных связующих для ПКМ // Сб. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2024. С. 173.

References

1. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials: textbook. Manual*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, 528 p.
2. Severs E.T. *Rheology of polymers*. Moscow: Khimiya, 1966, 200 p.
3. Schramm G. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*. Moscow: KolosS, 2003, 312 p.

4. Guseva M.A., Petrova A.P. Possibilities of rheology in the study of binders for PCM. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 7, pp. 38–45.
5. Kablov E.N., Antipov V.V. The Role of New Generation Materials in Ensuring the Technological Sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
6. 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: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
7. Guseva M.A., Prokopova L.A., Khaskov M.A. Determination of melting temperatures of solid polymers by the rheological method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2021, vol. 87, no. 7, pp. 38–43.
8. Tkachyk A.I., Kyznecova P.A., Donetskii K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
9. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. *Modern technologies for the production and processing of polymer and composite materials: textbook*. Tambov: Publ. House of TSTU, 2012, 180 p.
10. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Pavlenko S.A., Guseva M.A., Pykhtin A.A., Larionov S.A. Investigation of the influence of the thermal regime of FDM printing on the structuring and warping of polyethylene samples. *Trudy VIAM*, 2021, no. 7 (101), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-48-58.
11. Morozova V.S., Ivanov M.S., Shestakov A.M., Pavlukovich N.G. The influence of the melt flow of polyetheretherketone on the characteristics of carbon fiber plastic based on it. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-44-51.
12. Kuznetcova P.A., Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Eldjaeva G.B. Characteristics of the molten epoxy resin system VSE-62, processed by the injection methods, for the manufacture of highly loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-43-53.
13. Guseva M.A., Ibragimov Z.D. Selection of curing system when developing epoxy compositions with energy-efficient curing mode. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 28, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.
14. Guseva M.A. Application of Rheological Methods in the Development of Polymer Binders and Industrial Control. *Reports of the XXXI Symposium on Rheology*. Moscow: TIPS RAS, 2024, p. 87.
15. Guseva M.A. Rheological Approach to the Development of Polymer Binders for Polymeric Composites. *Reports of the VIII All-Rus. Sci. and Tech. Conf. «Polymer Composite Materials and New Generation Production Technologies»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2024, p. 173.

Информация об авторах

Гусева Марина Александровна, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Guseva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.04.2025.
The article was submitted 22.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 29.04.2025.

Научная статья

УДК 621.742.48

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТВЕРЖДЕННЫХ РАСПЛАВНЫХ КЛЕЕВЫХ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ МЕТОДАМИ СКЛЕРО- И МИКРОТВЕРДОМЕТРИИ

Р.К. Салахова¹, Е.А. Вешкин¹, А.В. Апалькова¹, Н.Д. Симирина¹

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

Аннотация. Представлены результаты измерений микротвердости в поперечном сечении образцов отвержденных связующих расплавного типа (составы I–VII), рассчитаны коэффициенты объемной анизотропии и изучена корреляционная зависимость между микротвердостью полимерной матрицы и силой сопротивления царапанию индентором. Проведен сравнительный анализ изменений микротвердости в высотном направлении образцов и склерограмм, полученных с помощью лабораторного скретч-тестера СТ-01. Для клеевого расплавного связующего пониженной горючести (состав VII) выбран оптимальный двухступенчатый режим отверждения и определена степень конверсии полимера.

Ключевые слова: клеевые расплавные связующие, обшивки заготовок панелей пола, микротвердость, склерометрия, сила сопротивления царапанию, степень отверждения, степень конверсии, коэффициент объемной анизотропии

Для цитирования: Салахова Р.К., Вешкин Е.А., Апалькова А.В., Симирина Н.Д. Исследование отвержденных расплавных клеевых эпоксидных связующих методами склеро- и микротвердометрии // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24.

Scientific article

STUDY OF CURED HOT MELT ADHESIVE EPOXY BINDERS BY SCLERO- AND MICROHARDNESS METHODS

R.K. Salakhova¹, E.A. Veshkin¹, A.V. Apalkova¹, N.D. Simirgina¹

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

Abstract. The results of cross-sectional microhardness measurements grade binders (compositions I–VII) are presented. Volumetric anisotropy coefficients are calculated, and the correlation between polymer matrix microhardness and the indenter scratch resistance parameter is studied. A comparative analysis of microhardness changes in the height direction of the samples and sclerograms obtained using an ST-01 laboratory scratch tester is conducted. For the low-flammability hot melt adhesive binder (composition VII), the optimal two-stage curing mode is selected, and the degree of polymer conversion is determined.

Keywords: hot melt adhesives, floor panel sheetings, microhardness, sclerometry, scratch resistance force, degree of curing, degree of conversion, volumetric anisotropy coefficient

For citation: Salakhova R.K., Veshkin E.A., Apalkova A.V., Simirgina N.D. Study of cured hot melt adhesive epoxy binders by sclero- and microhardness methods. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-12-24.

Введение

В настоящее время главным материалом, удовлетворяющим комплексу требований по весовой эффективности, механической прочности и химической инертности, являются композиты на основе полимерных, металлических и керамических матриц, армированных современными углеродными, борными, органическими и стеклянными волокнами [1–3]. Сохраняется тенденция неуклонного увеличения доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях, в частности в авиационной промышленности, которая является основным потребителем данного класса материалов [4]. Совершенствование существующих технологий изготовления ПКМ и создание новых конкурентоспособных материалов напрямую связаны с современными вызовами, продиктованными политикой импортозамещения и выполнением национальных проектов РФ, направленных на развитие отечественного авиастроения. Очевидно, что успешная реализация национального проекта «Беспилотные авиационные системы» (2025–2030 гг.) невозможна без технологического лидерства в области создания полимерных материалов с новым уровнем свойств, так как доля ПКМ в конструкции беспилотных летательных аппаратов может достигать 90 % [5].

Свойства любого композита определяют входящие в его состав компоненты, при этом роль матрицы является фундаментальной. Понятие «матрица» (от лат. *matrix* – источник, начало) характеризует непрерывную пространственную фазу, ответственную за технологические и эксплуатационные характеристики ПКМ. К ключевым функциям матрицы относятся связывание и стабилизация, передача нагрузки, защита наполнителя от внешних воздействий, определение формы, обеспечение термо-, огне- и химической стойкости, влияние на поверхностные свойства и др. Таким образом, разработка полимерных матриц для ПКМ – сложная и важная задача, причем выбор правильной матрицы определяет область применения композита и конструкции из ПКМ в целом [6].

В данной работе в качестве объектов исследования рассматриваются термореактивные клеевые связующие расплавного типа на основе эпоксидных смол, модифицированные термопластами (полисульфон клеевой ПСК-1, полиарилсульфон клеевой ПСФФ-30) [7, 8]. Особый интерес представляет исследование многокомпонентного клеевого связующего пониженной горючести, представляющего собой композицию из смеси эпоксидных смол, отвердителей, эластомера (каучук), термопласта и антипирена. Введенные специальные добавки повышают ударную вязкость и термостойкость материала практически без снижения его прочностных характеристик [9]. Механизм упрочнения при введении термопластов можно объяснить фазовой сепарацией материала в процессе отверждения, т. е. возникновением двухфазной гетерогенной системы, где пластичные частицы термопласта, равномерно распределенные в эпоксидной матрице, деформируясь, «залечивают» трещины, в том числе магистральные, заставляя их ветвиться и превращаться в микротрещины [10].

Использование модифицированного клеевого связующего пониженной горючести, армированного углеродным и стекловолокном, позволяет получать монолитные конструкционные ПКМ с необходимой толщиной монослоя, а также высоконагруженные сотовые (слоистые) конструкции одинарной и сложной кривизны с реализацией высокоэффективной технологии интегрального формования трехслойных сотовых панелей, при которой одновременно (за одну технологическую операцию) происходят формование обшивки и ее приклеивание к сотовому заполнителю [11]. Примером такого рода конструкций являются панели пола салона и багажно-грузового отсека современных пассажирских самолетов. Повышенный уровень эксплуатационных свойств расплавных связующих на основе эпоксидиановых смол связан с наличием кардовых групп в термопластичных добавках. Кардовые группы – это объемные боковые

циклические группы в повторяющемся звене макромолекул полисульфона, их количество определяет процесс термодинамического совмещения полиарилсульфона с эпоксидными смолами до полной гомогенизации смеси [12–14]. Экзотермический эффект реакции растворения полисульфонов в эпоксидиановом олигомере достаточно подробно исследован методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) путем построения термокинетических кривых [15].

Конечные свойства ПКМ зависят от многих факторов, основным из которых является степень отверждения полимерной матрицы (степень конверсии). Подбор оптимальных температурно-временных и монометрических параметров отверждения позволит достигнуть максимально возможной степени конверсии. В настоящее время для определения полноты протекания реакции отверждения широко используется метод ДСК. Прибор измеряет тепловой эффект реакции в отвержденном образце и сравнивает его с теплотой реакции неотвержденного (исходного) связующего, рассчитывая степень конверсии по полученной модели [16, 17]. На практике для оценки степени полимеризации часто используют метод экстракции с помощью аппарата Сокслета [18]. Общий принцип данного способа: неотвержденную полимерную матрицу вымывают при контакте образцов с насыщенным растворителем, циклический процесс продолжается до тех пор, пока весь растворимый компонент не будет извлечен из исследуемого образца. К недостаткам метода относятся необходимость подбора оптимального растворителя и сложность оценки завершения процесса экстрагирования.

Большинство неразрушающих и разрушающих методик контроля степени конверсии, в том числе указанные, являются интегральными и не позволяют оценить характеристики в объеме полимера. В связи с этим предложена методика оценки полимерной матрицы в объеме ПКМ, основанная на измерении твердости и стойкости к царапанию полимеров, традиционно применяемом для оценки физико-механических свойств металлических функциональных покрытий [19, 20]. Полимерные цепи редко располагаются хаотично, как правило, они образуют надмолекулярную структуру, при которой упорядоченное расположение молекул (или их фрагментов) стабилизируется не ковалентными, а более слабыми молекулярными взаимодействиями. При этом наличие упорядоченных областей (кристаллиты и сферолиты) обеспечивает повышение уровня механических свойств ПКМ. Доказано, что в термопластах степень кристалличности и размер сферолитов наиболее высокие [21]. Можно предположить, что при различных температурах выдержки в отверждаемых модифицированных термореактивных связующих формируется различная упаковка надмолекулярной структуры с преобладанием тех или иных кристаллических структур. Обоснованной представляется возможность исследования процесса упорядочения структур путем изменения величины микротвердости и анализа характера царапин полимерных материалов [22].

Исходя из изложенного, сформулированы цели данной работы:

- классифицировать отвержденные расплавные эпоксидные связующие по величине микротвердости;
- исследовать корреляционную зависимость микротвердости от силы сопротивления царапанию отвержденных эпоксидных связующих в поперечном сечении образцов;
- исследовать закономерность изменения микротвердости отвержденных связующих от степени конверсии полимера.

Для реализации поставленных целей выполнены оценка микротвердости и скретч-тестирование (склерометрия) отвержденных клеевых связующих в выбранной зоне исследования.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований выбраны расплавные термореактивные клеевые связующие на основе эпоксидиановых смол с добавлением модифицирующих добавок: I – связующее с пластификатором (каучук низкомолекулярный СКН-30 КТРА); II, III – связующие, модифицированные термопластом (полисульфон клеевой ПСК-1); IV, V, VI – связующие, модифицированные термопластом (полиарилсульфон порошкообразный клеевой ПСФФ-30); VII – связующее пониженной горючести с пластификатором (каучук), термопластом (полисульфон ПСК-1) и антипиреном.

Связующие отверждали при выбранных режимах на специальной оснастке в сушильном шкафу СМ 50/250 1000 ШС.

Реакционную способность связующих исследовали методом ДСК по ГОСТ Р 56755–2015. Условия проведения испытаний: нагрев до температуры от 25 до 280 °С со скоростью 10 °С/мин; охлаждение до температуры 60 °С со скоростью 15 °С/мин; продувочный и защитный газ – азот, скорость подачи составила 200 мл/мин (степень очистки 99,999 %).

Режимы отверждения связующих выбраны на основе анализа ДСК-кривых реакционной способности связующих и изотерм вязкости, полученных на ротационном вискозиметре. Степень отверждения связующих контролировали путем проведения термического анализа неотвержденных (базовых) и отвержденных связующих.

Степень конверсии в связующем пониженной горючести рассчитана с использованием специальной программы калориметрических измерений путем исследования кинетики отверждения образцов связующего по результатам ДСК и построения моделей расчетных кривых на основе экспериментальных [23]. Программа позволяет прогнозировать изменение степени полимеризации связующего в зависимости от температурно-временных режимов отверждения. Кривые ДСК получены при трех скоростях нагрева (5, 10 и 20 °С/мин). Расчет модели проводили для одностадийной реакции полимеризации.

Микротвердость отвержденных связующих измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3М по методу Виккерса при нагрузках 10 и 20 г. Оценку микротвердости и царапание отвержденных смол проводили на поперечных шлифах посередине образца в направлении от поверхности, прилегающей к дну лунок (углублений) оснастки. Получено не менее 10 отпечатков алмазной пирамиды в направлении, указанном на рис. 1.

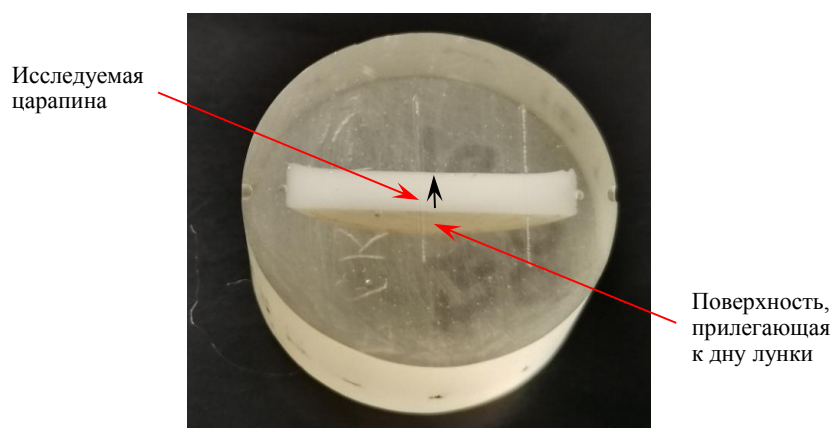


Рис. 1. Поперечный шлиф отвержденного связующего II

Предложена методика расчета коэффициента объемной анизотропии B , отражающего разницу в свойствах материала в различных точках образца, обусловленную неоднородностью структуры или другими факторами.

Коэффициент объемной анизотропии рассчитывали по формуле

$$B = (H_{\text{мс}} - H_{\text{мп}})/H_{\text{мс}},$$

где $H_{\text{мс}}$ – значение микротвердости в сердцевинной зоне образца, МПа; $H_{\text{мп}}$ – значение микротвердости в подповерхностной зоне образца, МПа.

Коэффициент объемной анизотропии является безразмерной величиной и свидетельствует о различиях в значениях микротвердости отвержденного связующего в высотном направлении. Как видно из формулы, этот параметр может принимать положительные, отрицательные или нулевые значения.

Скретч-тестирование образцов проводили с помощью лабораторного прибора СТ-01, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

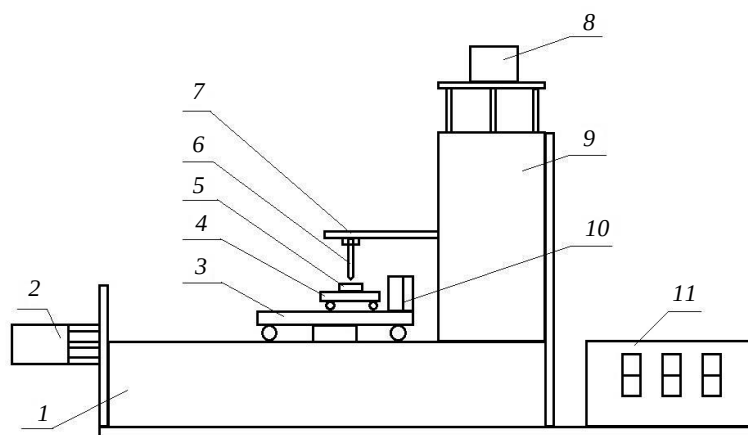


Рис. 2. Принципиальная схема скретч-тестера СТ-01: 1 – неподвижная платформа; 2 – двигатель привода подвижной платформы; 3 – подвижная платформа; 4 – тележка установки образца; 5 – образец; 6 – алмазный индентор; 7 – тензодатчик нагрузки индентора; 8 – двигатель привода индентора; 9 – привод индентора; 10 – тензодатчик силы сопротивления; 11 – блок управления

В процессе царапания на дисплее пульта управления прибора и мониторе компьютера отображаются нагрузка на индентор и сила сопротивления царапанию. Индентор представляет собой алмазный конус, угол при вершине которого составляет 120 градусов, а радиус скругления вершины равен 0,2 мм. Технические характеристики скретч-тестера СТ-01: максимальная длина царапания 40 мм, скорость царапания 1 мм/с, максимальные габариты образца 50×45 мм, нагрузка индентора на образец 30 Н, скорость нагружения 1,63 Н/с.

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

Результаты и обсуждение

Для контроля микротвердости и оценки сопротивления царапанию (склерометрические измерения) полимерных матриц на основе расплавных связующих изготовлены образцы отвержденных связующих I–VII. Отверждение проводили в термопечи, в качестве оснастки использовали диск полимеризационной плитки, схема которого представлена на рис. 3. Получены образцы в виде таблеток высотой от 2 до 5 мм. Режимы отверждения связующих представлены в табл. 1. При этом связующее пониженной горючести отверждали по двухступенчатому режиму с временным варьированием 2-й ступени.

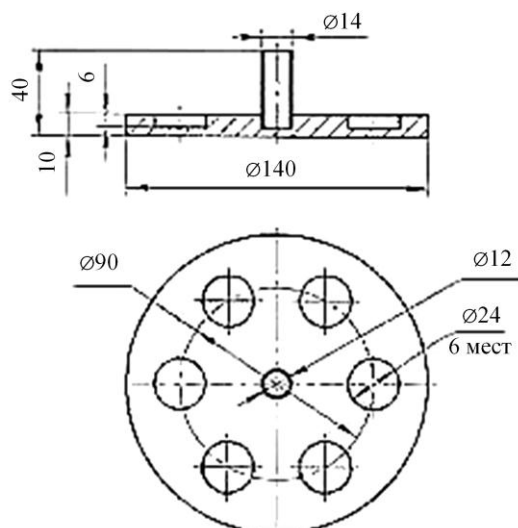


Рис. 3. Схема диска полимеризационной плитки

Таблица 1

Режимы отверждения связующих

Режимы отверждения связующих		
Связующее	Температура отверждения, °C	Продолжительность отверждения, мин
I	120	90
II	155	
III	165	
IV	145	
V	150	
VI		
VII	90 (1-я ступень)	60
	140 (2-я ступень)	30, 60, 180

Степень полимеризации связующих контролировали путем проведения термического анализа с построением кривых реакционной способности неотвержденных и отвержденных связующих. На рис. 4 представлены ДСК-кривые полимеризации связующего VII, отвержденного при различных режимах второй ступени (кривые 1.1, 3.1, 4.1) в сравнении с неотвержденным связующим (кривая 2.1).

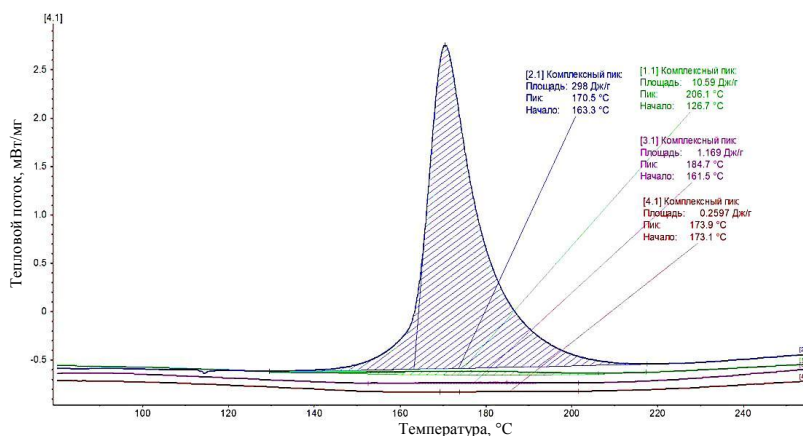


Рис. 4. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии для образцов связующего VII, отвержденных по двухступенчатому режиму при продолжительности 2-й ступени 30 (1.1), 60 (3.1), 180 мин (4.1) и неотвержденного (2.1)

Анализ кривых показал, что выбранный двухступенчатый режим отверждения связующего VII обеспечивает практически полную степень отверждения, причем при увеличении продолжительности выдержки образцов на 2-й ступени (30, 60 и 180 мин) степень отверждения связующего повышается (96,45; 99,61 и 99,91 % соответственно).

Этот факт подтверждается также полученными моделями температурно-временных режимов отверждения и кривыми зависимости степени конверсии полимера от продолжительности изотермической выдержки, построенными на основе термокинетических расчетов ДСК-кривой (рис. 5 и 6). Сходимость результатов оценки степени отверждения связующего по реакционной способности и результатов исследования степени конверсии свидетельствует об адекватности выбранной модели отверждения полимерной матрицы VII.

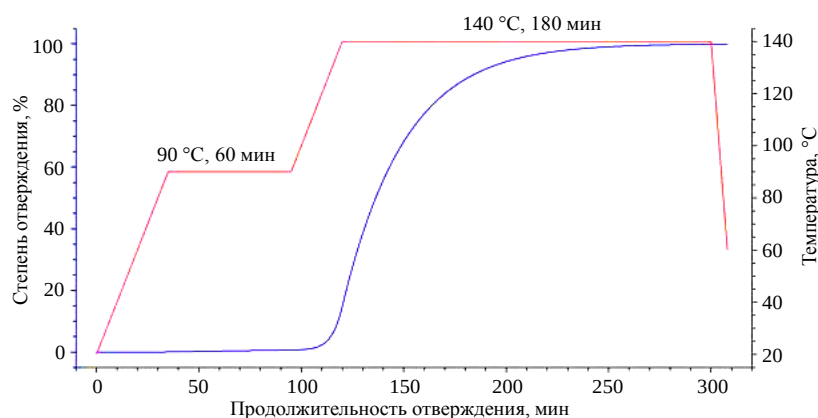


Рис. 5. Моделирование двухступенчатого режима отверждения связующего VII

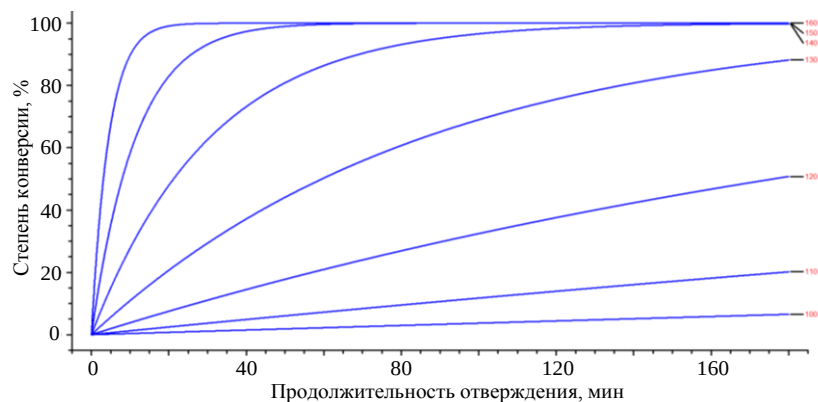


Рис. 6. Прогнозируемое изменение степени конверсии связующего VII при изотермических выдержках в диапазоне температур от 100 до 160 °C

На рис. 7 представлены графики изменения микротвердости отвержденных связующих по толщине образцов в высотном направлении.

Полученные результаты позволяют утверждать, что значения микротвердости для связующих I, II, III и VII практически не зависят от позиционирования измерений по толщине образца, а для связующего IV и вовсе не меняются в высотном направлении. Тогда как для связующих V и VI характерна нелинейная зависимость с небольшими точками максимума. При этом следует отметить, что максимальное значение микротвердости зафиксировано для полимерной матрицы VI (345,3 МПа), минимальное – для связующего пониженной горючести VII (178,7 МПа).

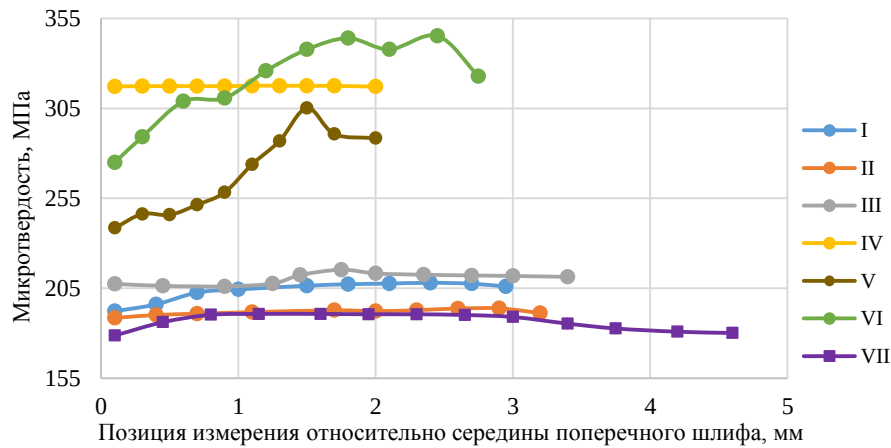


Рис. 7. Исследование микротвердости отвержденных клеевых связующих I–VII

Склерограммы отвержденных связующих получены на лабораторном скретч-тестере СТ-01, нагрузка индентора на образец составила 30 Н, фиксировали силу сопротивления царапанию.

Проведенный сравнительный анализ данных склеро- и микротвердометрии показал корреляцию полученных результатов для всех указанных связующих при обратной зависимости силы сопротивления царапанию от микротвердости. Очевидно, что чем больше микротвердость материала, тем он легче царапается и, соответственно, меньше сила сопротивления царапанию, что наглядно продемонстрировано на рис. 8 и 9 на примере связующих V и VII. Кривые зависимости на рис. 8 и 9, *а*, *б* являются практически зеркальным отражением друг друга.

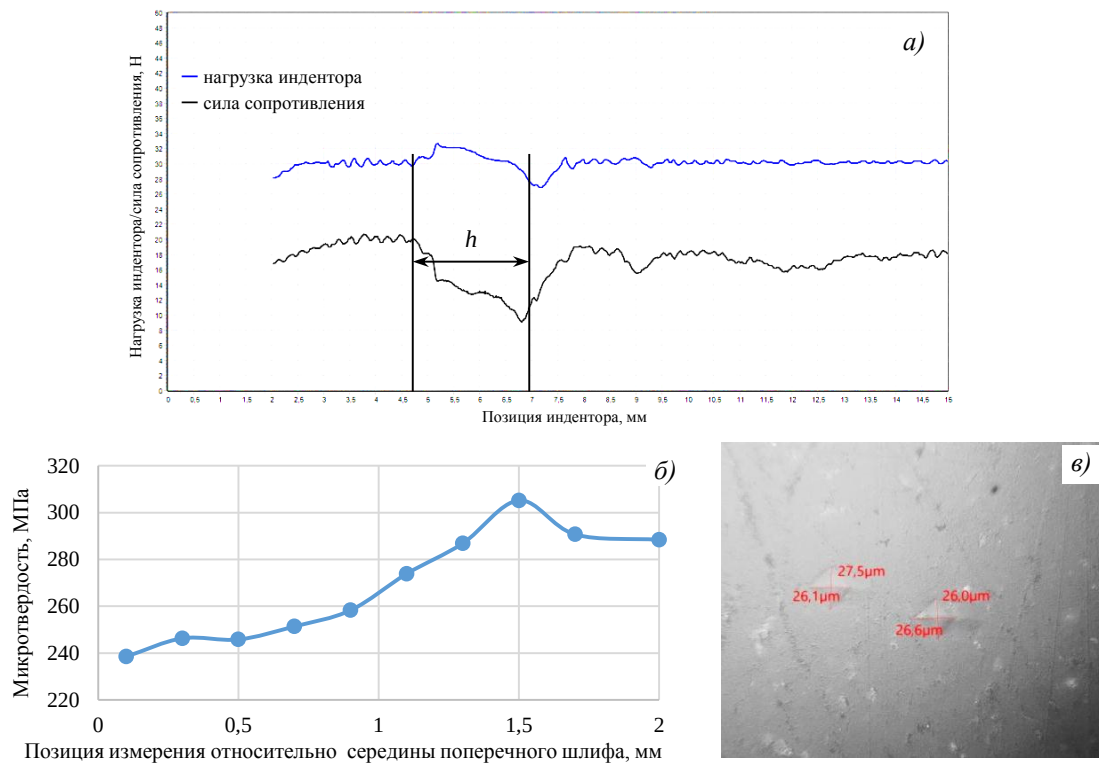


Рис. 8. Исследование отверждения связующего V: *а* – метод склерометрии (*h* – толщина образца); *б*, *в* – метод микротвердометрии (отпечаток получен при нагрузке 10 г)

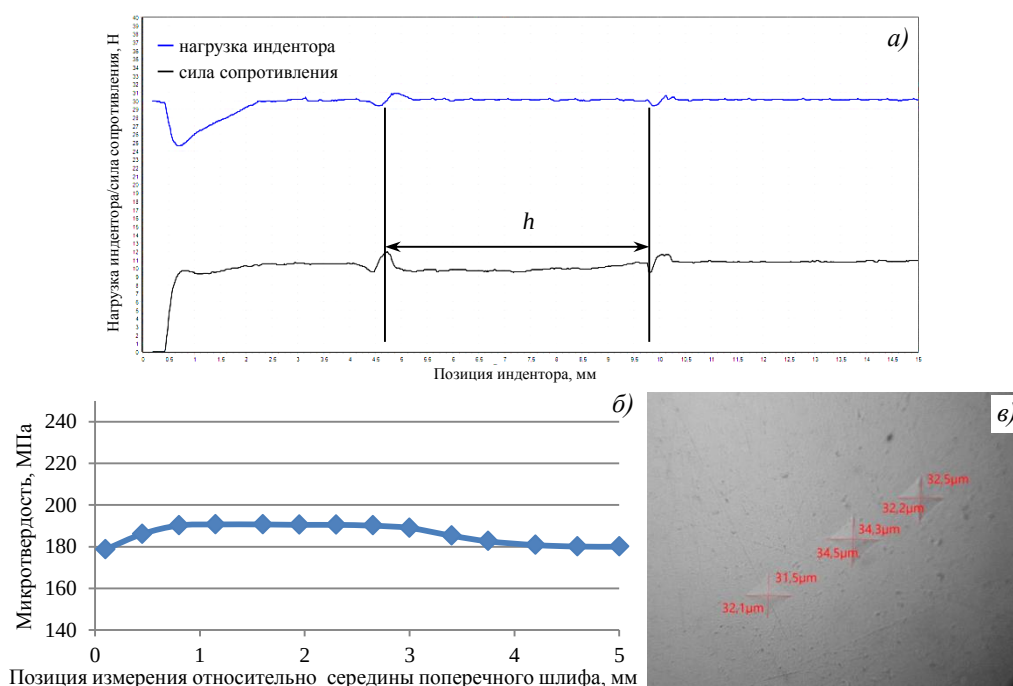


Рис. 9. Исследование отверждения связующего VII: *а* – метод склерометрии (*h* – толщина образца); *б*, *в* – метод микротвердометрии (отпечаток получен при нагрузке 10 г)

Результаты измерений микротвердости и скретч-тестирования отвержденных связующих сведены в табл. 2. За результат склерометрических измерений принимали значение силы сопротивления царапанию на плато склерограмм. Рассчитан коэффициент объемной анизотропии B , величина которого не превысила 0,10 и для всех видов связующего имеет положительный знак. Полученные значения коэффициента B свидетельствуют о высокой однородности и пониженной анизотропии свойств отвержденных полимеров, а полимерную матрицу связующего IV с коэффициентом объемной анизотропии, стремящимся к нулю ($9,45 \cdot 10^{-4}$), можно отнести к изотропному полимеру. Нулевые значения коэффициента объемной анизотропии характеризуют отсутствие анизотропии свойств в сечении образца. Положительный знак коэффициента B , характерный для экзотермических реакций отверждения, согласуется с данными термохимического анализа связующих.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости и скретч-тестирования отвержденных связующих

Связующее	Микротвердость по Виккерсу, МПа	Сила сопротивления царапанию, Н	Коэффициент объемной анизотропии B
I	<u>192,2–208,7</u> 203,8	9,5	0,03
II	<u>188,5–193,8</u> 191,8	9,7	0,02
III	<u>206,0–215,3</u> 210,5	9,5	0,02
IV	<u>317,1–317,6</u> 317,4	8,8	$\sim 0 (9,45 \cdot 10^{-4})$
V	<u>238,5–305,2</u> 268,5	9,2	0,02
VI	<u>275,0–345,3</u> 319,7	8,8	0,10
VII	<u>178,7–190,7</u> 186,1	9,8	0,06

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

В дальнейшем предполагается продолжить склерометрические исследования полимерных матриц – изучить характеристики самих царапин (ширина, глубина и морфология склерометрических бороздок), в том числе для оценки объемной анизотропии ненаполненных отвержденных связующих.

Заключения

Проведена классификация отвержденных клеевых расплавных связующих по величине микротвердости, позволяющая прогнозировать степень отверждения связующих.

Исследована корреляционная зависимость между микротвердостью полимерной матрицы и силой сопротивления царапанию индентором, установлена обратная корреляция этих величин. По характеру склерограмм можно прогнозировать закономерность изменения микротвердости исследуемой зоны.

Исследована кинетика реакции отверждения связующего пониженной горючести VII, получена адекватная модель температурно-временных режимов отверждения, обеспечивающая степень конверсии связующего >99 %.

Работа проведена 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 04.07.2023 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 – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // Наука и жизнь. 2009. № 10. С. 6–10.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
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: 23.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
6. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
7. 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: 09.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
8. 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.
9. Чурсова Л.В., Цыбин А.И., Гребенева Т.А. Связующие для полимерных композиционных и функциональных материалов. Предшествующий опыт, современное состояние и перспективы развития // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 2 (26). С. 34–46. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 09.04.2025).

10. Сопотов Р.И., Горбунова И.Ю., Онучин Д.В. и др. Влияние модификаторов полисульфона и полиэфирсульфона на термомеханические свойства эпоксисинтетического связующего // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. 29. № 10. С. 62–64.
11. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. и др. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
12. Копицына М.Н., Бессонов И.В., Котомин С.В. Трещиностойкость эпоксидных связующих, модифицированных термопластичным полисульфоном и фурфуролацетоновой смолой // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 12. С. 1–9.
13. Хасбулатова З.С. Ароматические полисульфоны // Пластические массы. 2009. № 4. С. 20–23.
14. Костромина Н.В., Олихова Ю.В., Малаховский С.С., Горбунова И.Ю. Разработка эпоксидных связующих, модифицированных термостойкими термопластами, для создания армированных композиционных материалов // Пластические массы. 2022. № 9-10. С. 17–19.
15. Бородулин А.С. Пластификаторы для эпоксидных клеев и связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 7. С. 31–35.
16. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринев Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
17. 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: 08.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
18. Медведева К.А., Черезова Е.Н. Изучение в качестве отвердителей для эпоксидных олигомеров новых аминифенольных соединений // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. Ч. 5. С. 1085–1088.
19. Семенычев В.В., Салахова Р.К. Прибор для оценки свойств покрытий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 2. С. 60–65.
20. Салахова Р.К., Кирилин С.Г., Тихообразов А.Б., Смирнова Т.Б. Скретч-тестирование электролитических никелевых покрытий на углепластиковой подложке // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 4. С. 100–114.
21. Заболотнов А.С., Гостев С.С., Маклакова И.А. и др. Влияние кристаллической структуры на комплекс физико-механических характеристик композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Высокомолекулярные соединения. Сер.: Б. 2023. Т. 65. № 5. С. 341–346.
22. Матвеева Л.Ю., Ястребинская А.В. Взаимосвязь надмолекулярной структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 49–54.
23. Вешкин Е.А., Славин А.В., Постнова М.В., Апалькова А.В. Роль температурно-временных условий отверждения в формировании свойств однонаправленного и равнопрочного углепластиков // Авиационные материалы и технологии. 2025. № 2 (79). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

References

1. Kablov E.N. New Generation Materials – the Basis for Innovation, Technological Leadership, and National Security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Kablov E.N. Science as a Branch of the Economy. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 10, pp. 6–10.

3. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
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: September 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 30, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
6. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
7. 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: April 09, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
8. 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 tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
9. Chursova L.V., Tsybin A.I., Grebeneva T.A. Binders for polymer composite and functional materials. Previous experience, current status and development prospects. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2017, no. 2 (26), pp. 34–46. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: April 09, 2025).
10. Sopotov R.I., Gorbunova I.Yu., Onuchin D.V. et al. Effect of polysulfone and polyethersulfone modifiers on the thermomechanical properties of epoxyamine binder. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2015, vol. 29, no. 10, pp. 62–64.
11. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N. et al. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
12. Kopitsyna M.N., Bessonov I.V., Kotomin S.V. Crack resistance of epoxy binders modified with thermoplastic polysulfone and furfural acetone resin. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2016, no. 12, pp. 1–9.
13. Khasbulatova Z.S. Aromatic polysulfones. *Plasticheskiye massy*, 2009, no. 4, pp. 20–23.
14. Kostromina N.V., Olikhova Yu.V., Malakhovsky S.S., Gorbunova I.Yu. Development of epoxy binders modified with heat-resistant thermoplastics for the creation of reinforced composite materials. *Plasticheskiye massy*, 2022, no. 9–10, pp. 17–19.
15. Borodulin A.S. Plasticizers for epoxy adhesives and binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 7, pp. 31–35.
16. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 06, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
17. 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: October 08, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
18. Medvedeva K.A., Cherezova E.N. Study of new aminophenolic compounds as hardeners for epoxy oligomers. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 6, part 5, pp. 1085–1088.
19. Semenychev V.V., Salakhova R.K. Device for assessing coating properties. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 2, pp. 60–65.
20. Salakhova R.K., Kirilin S.G., Tikhoobrazov A.B., Smirnova T.B. Scratch testing of electrolytic nickel coatings on a carbon fiber substrate. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 100–114.

21. Zabolotnov A.S., Gostev S.S., Maklakova I.A. et al. Influence of Crystalline Structure on a Set of Physicomechanical Characteristics of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: B*, 2023, vol. 65, no. 5, pp. 341–346.
22. Matveeva L.Yu., Yastrebinskaya A.V. Relationship between Supramolecular Structure and Properties of Polymer Composite Materials Based on Thermosetting Binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2017, no. 12, pp. 49–54.
23. Veshkin E.A., Slavin A.V., Postnova M.V., Apalkova A.V. The role of temperature-time curing conditions in the formation of unidirectional and equally strong carbon fiber plastics properties. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 2 (79), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-2-59-71.

Информация об авторах

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

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Апалькова Анна Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Симиргина Наталья Дмитриевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Evgeniy A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anna V. Apalkova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia D. Simirgina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.12.2025.
The article was submitted 01.12.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.12.2025.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-25-36

**ПАНЕЛИ ПОЛА САЛОНА И БАГАЖНО-ГРУЗОВОГО ОТСЕКА
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
СОВРЕМЕННОГО ОТЕЧЕСТВЕННОГО САМОЛЕТА****Часть 1. Разнообразие требований отечественных разработчиков
воздушных судов к панелям пола салона и багажно-грузового отсека
из полимерных композиционных материалов***А.А. Баранников¹, Е.А. Вешкин¹, П.В. Шершак¹, Ан.Р. Галиуллин¹*

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

Аннотация. Рассмотрены различные подходы отечественных разработчиков авиационной техники к формированию требований для проектирования и производства панелей пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов. Проанализированы требования, предъявляемые к панелям пола и багажно-грузового отсека современных отечественных самолетов МС-21-300, SSJ-NEW, Ил-114-300, Ту-214 и др. с учетом мирового опыта. Рассмотрены проблемы унификации технических требований и возможности применения отечественных разработок в конструкции различных типов воздушных судов.

Ключевые слова: самолет, полимерные композиционные материалы, углепластик, панели пола, салон самолета, багажно-грузовой отсек

Для цитирования: Баранников А.А., Вешкин Е.А., Шершак П.В., Галиуллин Ан.Р. Панели пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов современного отечественного самолета. Часть 1. Разнообразие требований отечественных разработчиков воздушных судов к панелям пола салона и багажно-грузового отсека из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-25-36.

Scientific article

**FLOOR PANELS OF THE CABIN AND BAGGAGE
AND CARGO COMPARTMENT FROM POLYMER COMPOSITE
MATERIALS FOR MODERN DOMESTIC AIRCRAFT****Part 1. Diversity of requirements of domestic aircraft developers for cabin
and baggage and cargo compartment floor panels from polymer composite materials***A.A. Barannikov¹, E.A. Veshkin¹, P.V. Shershak¹, An.R. Galiullin¹*

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 examines the differences in approaches of domestic aircraft developers to the formation of requirements for the design and production of cabin floor panels and baggage and cargo compartment made of polymer composite materials. The article examines the analysis of requirements for floor panels and baggage and cargo compartment of modern domestic aircraft: MS-21-300, SSJ-NEW, Il-114-300, Tu-214 and other models, taking into account world experience. The problems of unification of technical requirements and the possibility of using domestic developments in the design of various types of aircraft are considered.

Keywords: aircraft, polymer composite materials, carbon plastic, floor panels, cabin, baggage and cargo compartment

For citation: Barannikov A.A., Veshkin E.A., Shershak P.V., Galiullin An.R. Floor panels of the cabin and baggage and cargo compartment from polymer composite materials for modern domestic aircraft. Part 1. Diversity of requirements of domestic aircraft developers for cabin and baggage and cargo compartment floor panels from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-25-36.

Введение

В настоящее время Российская Федерация подвергается многочисленным и целенаправленным вызовам и угрозам со стороны ведущих стран мира. Санкционная политика, проводимая этими странами, направлена на снижение национальной безопасности Российской Федерации во всех ее аспектах. Одним из таких аспектов является авиационная отрасль, которая в современных условиях имеет особое значение для транспортной системы нашей страны. Воздушный транспорт используется во всех видах сообщений – местном, региональном, магистральном и международном [1].

К 2022 г. гражданский сектор отрасли насчитывал 1287 воздушных судов, принадлежавших различным российским эксплуатантам. При этом парк отечественной авиационной техники, произведенной в Российской Федерации или бывшем Союзе Советских Социалистических Республик, составлял 36,5 %. В этом же году государство столкнулось с выбыванием иностранных воздушных судов и необходимостью ускоренного перехода на отечественную технику, чтобы в перспективе исключить потери численного состава современного авиационного парка и соответствующих объемов перевозок. В этой связи разработана Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года (далее – Программа), в рамках которой предусмотрены ускоренное замещение и поддержание имеющегося парка иностранных воздушных судов, а также увеличение парка отечественной авиационной техники. В рамках Программы к 2030 г. предполагается поставка 994 единиц современной отечественной авиационной техники (табл. 1) [2].

Таблица 1

Прогнозные показатели поставок авиационной техники отечественного производства и доля полимерных композиционных материалов в их конструкции

Модель самолета	Количество, шт.	Доля полимерного композиционного материала в конструкции самолета, % (не более)
МС-21-300	270	40
SSJ-NEW	142	25
Ту-214	115	
Ил-114-300	51	15
ЛМС-192	158	10
ЛМС-901 «Байкал»	139	
ТВРС-44 «Ладога»	105	
Ил-96-300	14	

Отечественная авиационная техника, представленная в Программе, разработана с учетом широкого применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в их конструкциях. Использование ПКМ обусловлено снижением массы, повышением прочности, жесткости и эксплуатационных характеристик элементов конструкции авиационной техники. Этот факт касается не только нагруженных элементов конструкции планера, но и элементов интерьера салона самолета и багажно-грузового отсека (БГО) [3].

Одним из основных элементов интерьера салона самолета и БГО является пол. Конструкция пола представляет собой набор панелей, площадь которых составляет ~ 80 и ≥ 200 м² у региональных и магистральных самолетов соответственно, а масса – от 250 до 500 кг. Комплект панелей пола формируется из заготовок трехслойных сотовых панелей, различающихся по массе и прочностным параметрам в зависимости от их расположения в салоне и БГО авиационной техники [4, 5]. Впервые в отечественной практике создания пассажирских самолетов панели пола из ПКМ (сотовые и многослойные) использованы при проектировании самолета Ил-96-300 [6].

В настоящее время из восьми отечественных самолетов, представленных в Программе, лишь к панелям пола самолета МС-21-300 предъявляют особые требования по прочности и жесткости. При этом необходимо отметить, что из всех представленных воздушных судов только в конструкции самолета Ил-114-300 применяются панели пола, полностью изготовленные из отечественных материалов, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Если в случаях с самолетами МС-21-300, SSJ-NEW, Ту-214, Ил-114-300, ЛМС-192, ЛМС-901 «Байкал» и ТВРС-44 «Ладoga» вопрос внедрения панелей пола разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ остается лишь за принятием разработчиком соответствующего решения, то в случае с самолетом МС-21-300 необходимо разработать панели пола с необходимыми характеристиками, соответствующими техническим требованиям.

При проектировании конструкций панелей пола из ПКМ необходимо руководствоваться требованиями норм летной годности (АП-25), принимать во внимание разнообразие индивидуальных требований разработчиков воздушных судов, существующие типовые решения и возможность получения новых проектных решений. В свою очередь при разработке новых решений необходимо учитывать технологические, материаловедческие, производственные факторы и ряд специфических требований к панелям пола современных пассажирских самолетов: обеспечение стойкости к ударным и другим сосредоточенным нагрузкам (продавливание каблуком дамских туфель, циклическое нагружение роликами тележки с продуктами и др.) [4]. В связи с тем, что ПКМ являются в различной степени пожароопасными [7], ведущие мировые компании работают над созданием таких материалов, которые будут отвечать сбалансированному комплексу физико-механических свойств, огнестойкости и токсичности, а также экономической эффективности.

До того как ПКМ начали активно внедрять в конструкции авиационной техники, панели пола изготавливали в виде трехслойной конструкции с обшивками из таких материалов, как фанера, стеклотекстолит КАСТ-В, листовой алюминий, в качестве заполнителей использовали пенопласт или алюминиевые соты [8]. Применение ПКМ нового поколения позволяет добиться среднего снижения массы 1 м² панелей пола более чем на 30 %. При этом важно учитывать, что снижение массы не должно влиять на конструктивные характеристики разных типов панелей пола, используемых в различных видах самолетов и на их конкретных участках, т. е. панели пола при минимально возможной массе должны иметь достаточную жесткость и прочность. При передвижении пассажиров по салону самолетов должно быть обеспечено ощущение достаточной жесткости конструкции через тактильные ощущения приемлемо малых прогибов [9–11].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» [12].

Материалы и методы

Достижение поставленной задачи невозможно без аналитического обзора состояния вопроса в отечественном авиастроении. Обзор проведен на основе изучения широкого круга российских и зарубежных научно-технических журналов и патентов,

освещающих современное состояние вопроса. В исследовании использованы фонды НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, РГБ, ГПНТБ, НЭБ eLIBRARY.RU, ВПТБ, официальные сайты производителей панелей пола, базы данных в сети Интернет.

Результаты

В настоящее время в Российской Федерации существуют четыре независимых друг от друга разработчика авиационной техники, чьи изделия до 2030 г., в соответствии с планами правительства, будут обеспечивать полный объем авиационных перевозок в стране и их рост: ПАО «Яковлев», ПАО «Ил», АО «Туполев», АО «УЗГА». Как правило, в конструкции пола воздушных судов представленных разработчиков различают четыре типа панелей пола в зависимости от зоны расположения: I – в подкресельной зоне, II – в зоне проходов, III – в сервисной зоне (вход/выход), IV – в БГО. На рис. 1–5 представлен пол салона и БГО самолетов SSJ-100/SSJ-NEW, Ил-114-300, МС-21-300, Ту-214 и Ил-96-300. Несмотря на унификацию расположения по самолету требования к панелям пола в конкретных зонах существенно различаются.

Так, в 2008 г. разработчик самолета SSJ-100 для каждого типа панелей пола в самолете сформировал технические требования (табл. 2) на базе заготовок панелей пола (ЗПП) Fibrelam Grade (компания Hexcel, США).

Таблица 2

Изменение технических требований к панелям пола самолета SSJ-100/SSJ-NEW [3]

Показатель	Тип панели	Значения показателей в соответ- ствии с техническими требованиями	
		2008 г.	2023 г.
Разрушающее усилие при изгибе длинной балки перпендикулярно направлению склейки сот, Н (не менее)	I	1100	1100
	II	1400	1400
	III	2450	2450
	IV		1400
Разрушающее усилие при изгибе короткой балки перпендикулярно направлению склейки сот, Н (не менее)	I	2040	1600
	II	3480	2520
	III	3400	
	IV		
Усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, Н/76 мм (не менее)	I	290	200
	II	330	
	III	200	
	IV		
Прочность при сдвиге в плоскости листа, Н/мм (не менее)	I	53	40
	II		
	III		
	IV		
Примечание. Данные 2008 г. представлены для самолета SSJ-100, 2023 г. – для самолета SSJ-NEW.			

В части требований по горючести все разработчики авиационной техники ориентируются исключительно на положения АП-25: для панелей пола I, II и III типов – Приложение F, Часть I (a)(1)(i), (b), IV типа – Приложение F, Часть I (a)(1)(ii), (b) и (a)(2)(iii), (b). Поэтому в данной работе требования по горючести отдельно не рассматриваются. При этом следует обратить внимание на то, что проблема обеспечения пожарной безопасности остается актуальной при разработке ПКМ, доля которых в составе авиационных конструкций, включая элементы интерьера, постоянно возрастает [13].

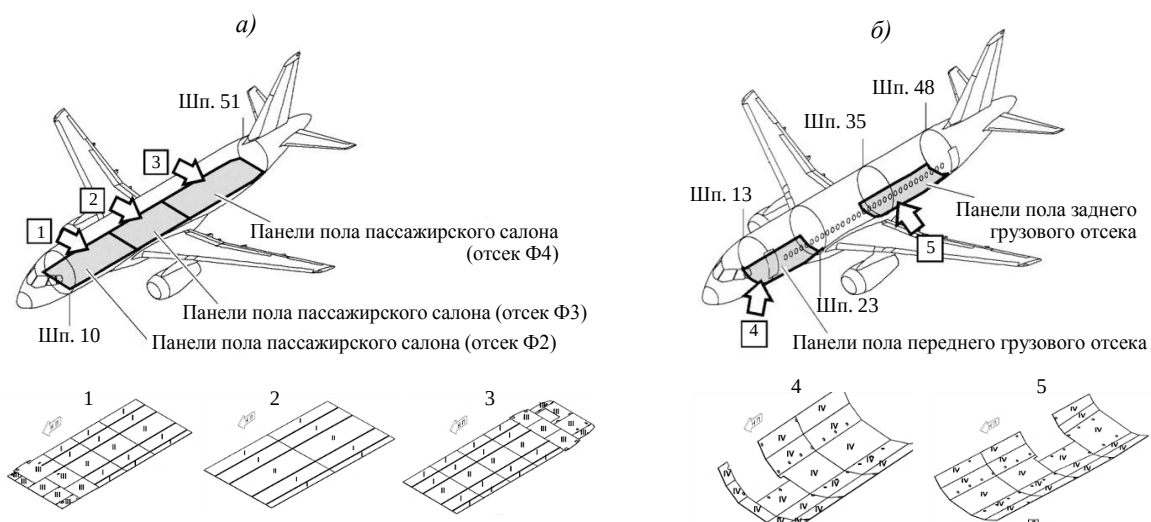


Рис. 1. Панели пола салона (а) и багажно-грузового отсека (б) самолета SSJ-100



Рис. 2. Панели пола салона и багажно-грузового отсека самолета Ил-114-300

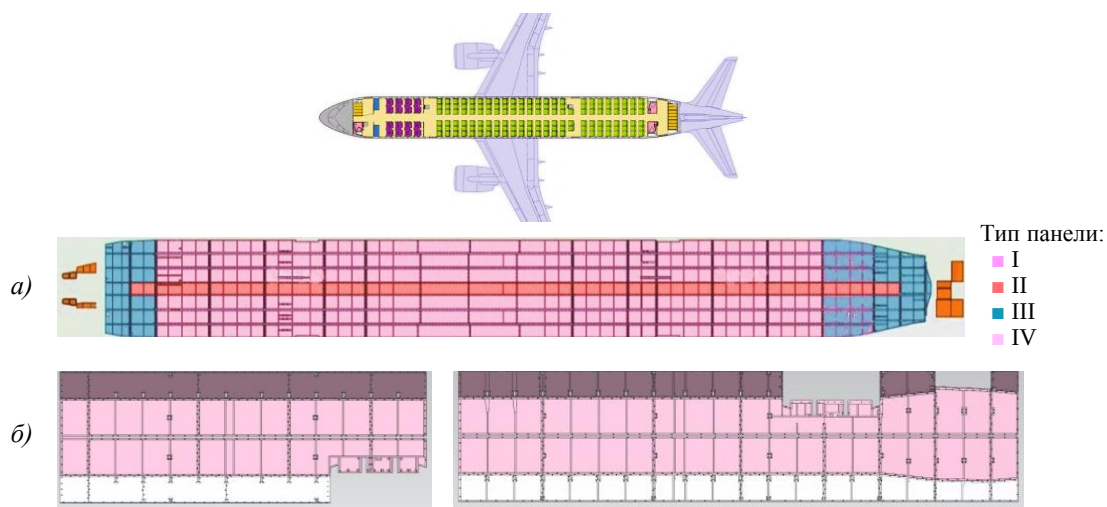


Рис. 3. Панели пола салона (а) и багажно-грузового отсека (б) самолета MC-21-300

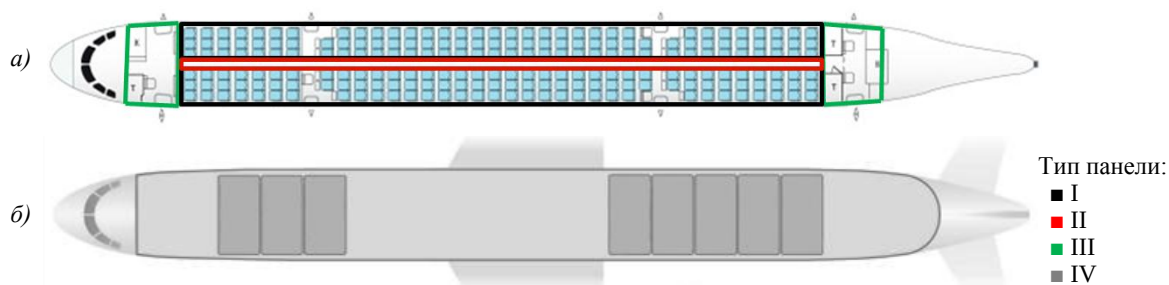


Рис. 4. Панели пола салона (а) и багажно-грузового отсека (б) самолета Ту-214

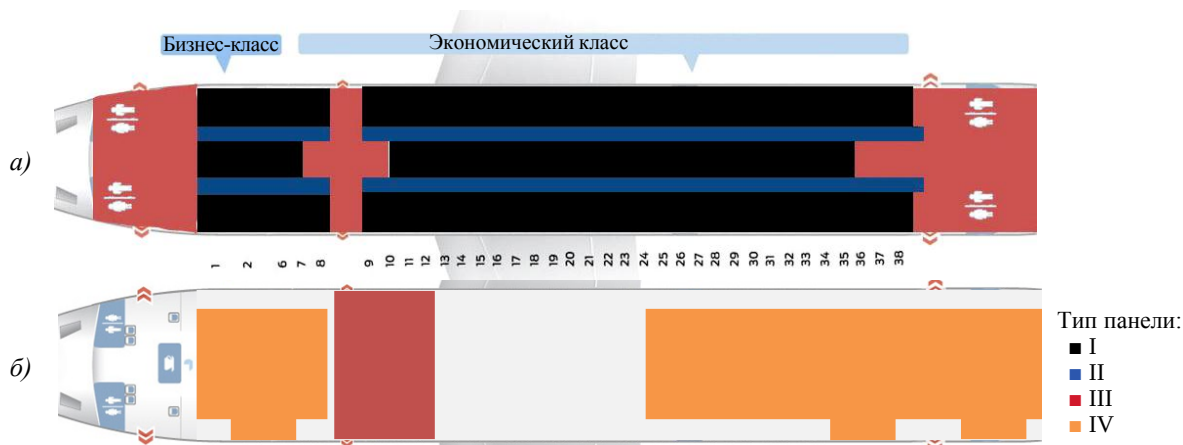


Рис. 5. Панели пола салона (а) и багажно-грузового отсека (б) самолета Ил-96-300

С учетом данных ранее проведенных работ по внедрению ЗПП производства компании Hexcel в конструкцию самолетов Ту-204 и Ту-214 (АО «Туполев») уточнены свойства производимых ЗПП. В результате требования к ЗПП были скорректированы, выпущены ТУ 752.001–01, на которые впоследствии могли ориентироваться другие разработчики воздушных судов.

При формировании технических требований в 2008 г., помимо массово-прочностных и эксплуатационных показателей, разработчик регламентировал состав ЗПП. Учитывая тот факт, что в 2008 г. в стране отсутствовали ПКМ для изготовления ЗПП, разработчик рассматривал в качестве основных материалы зарубежных компаний Hexcel (США) или Gurit (Швейцария). Объясняя необходимость унификации с импортными воздушными судами (ЗПП проходили по спецификации Boeing BMS4-17), заготовки панелей пола поставляла вначале компания Hexcel (США), а затем вплоть до 2014 г. – ее дочерняя компания AIM Altitude UK Ltd (Великобритания) [14].

В 2014 г., учитывая геополитическую обстановку, разработчик самолета SSJ-100 начал поиск поставщика ЗПП внутри страны. Разработчик сформировал разные технические требования к ЗПП с обшивками из стекло- и углепластика. Технические требования были направлены в ряд организаций, в том числе в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО НИАТ, ООО ЦАТИ.

В ходе проведения опытных работ по производству панелей пола в АО НИАТ установлено, что при заданных разработчиком параметрах исходных полуфабрикатов крайне трудно получить необходимые характеристики ЗПП с учетом того, что исходные материалы могут поставляться с определенным допустимым разбросом значений свойств. В таком случае необходимо было делать селективный отбор исходных материалов, к чему зарубежные поставщики полуфабрикатов были не готовы. Кроме того, разработчик воздушного судна выдвигал строгие требования к дымообразованию (компонентам дыма), в то время как во всей мировой практике поставок эти требования считались факультативными (обязательные требования предъявляются только к горючести) и практически невыполнимыми для панелей пола, которые, в отличие от других трехслойных интерьерных панелей, изготавливали из препрегов на основе не фенольного, а эпоксидного связующего для достижения необходимых механических свойств [3, 4].

Параллельно с работами, проводимыми АО НИАТ, разработчик согласовал технические требования с компанией AIM Altitude UK Ltd, которая вплоть до 2020 г. поставляла соответствующие им ЗПП [14]. Однако с ужесточением санкционной политики поставки были прекращены.

В итоге полученный технический задел стал основой для формирования технических требований к панелям пола самолета SSJ-NEW, который начали проектировать в 2019 г. В табл. 2 представлены технические требования, которые претерпели значительные изменения с 2008 г.

Следует отметить, что с момента изготовления первого серийного самолета SSJ-100 (2008 г.) прошло 17 лет, выпущено 232 машины (с 2019 г. выпущено 67 машин). В процессе эксплуатации по истечении определенного налета панели пола требуют замены на аналогичные. Складские запасы ЗПП производства компании AIM Altitude UK Ltd не безграничны. В связи с этим возникает острая необходимость в разработке ЗПП отечественного производства, соответствующих требованиям ПАО «Яковлев». В настоящее время эту проблему пытается решить ряд предприятий нашей страны путем внедрения отечественных материалов в конструкцию самолета SSJ-100, а впоследствии – в модель SSJ-NEW.

В это же время проблемным вопросом являлось обеспечение панелями пола самолета Ил-114-300. Разработчик ПАО «Ил» для своего самолета сформировал технические требования к ЗПП (табл. 3) с учетом опыта применения ЗПП производства компании AIM Altitude UK Ltd на самолетах SSJ-100 и Ан-148.

Таблица 3

Технические требования к панелям пола самолетов Ил-114-300, Ил-96-300 и Ту-214 [15]

Показатель	Тип панели	Значения показателей для панелей			
		компании AIM Altitude UK Ltd	разработки НИЦ «Кур- чатовский институт» – ВИАМ для самолета Ил-114-300	согласно техническим требованиям для самолета	
				Ил-96-300	Ту-214
Масса 1 м ² , кг (не более)	I	2,5	2,34	1,6	2,53
	II	3,0	3,00	1,8	3,12
	III	3,6			3,80
	IV				5,36
Прочность при сжати и, МПа (не менее)	I	5	10,5	3,43	4,13
	II	13			11,03
	III				17,24
	IV				
Разрушающее усилие при изгибе длинной балки пер- пендикулярно направлению склейки сот, Н (не менее)	I	1100	1245	1020	1023
	II	1300	2550	1422	
	III	1700			2002
	IV				
Прогиб при усил ии 445 Н, мм (не более)	I	14	10	30,0	21,6
	II	15	8	20,0	
	III				
	IV				
Усилие отслаивания об- шивки от сотового заполни- теля, Н/76 мм (не менее)	I	392	305	140	222
	II		459		
	III				
	IV				

Конструкторы ПАО «Ил» прежде всего учитывали тот факт, что на момент конструкторской проработки самолета ЗПП из российских материалов отсутствовали на рынке, а ПАО «Ил» – ВАСО в рамках кооперации внутри контура ПАО ОАК занималось доводкой ЗПП компании AIM Altitude UK Ltd до панелей пола (устанавливались втулки крепления, торцы панелей и места размещения втулок крепления заполнялись полимерной синтактной пастой). Однако в связи с санкционным давлением со стороны

западных стран прекратились поставки импортных ЗПП, исходных компонентов, препрегов, а в 2020 г. – полимерной бумаги Nomex для изготовления полимеросотопласта марки ПСП-1 производства ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина.

В кратчайшие сроки, используя научно-технический задел, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ при участии специалистов ПАО «Ил» разработал ЗПП на основе препрегов с пониженной горючестью [16, 17] полностью из российских компонентов. Новые разработки внесены в конструкторскую документацию, на них оформлена вся необходимая нормативная документация (ТУ 1-595-УНТЦ-1930–2021) и в течение 2021 г. освоено их серийное производство (табл. 3) [3]. Учитывая невозможность поставки на тот момент полимеросотопласта марки ПСП-1, использовали сотовый заполнитель марки ССП-1-2,5 производства ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина. В 2021 г. поставлен самолетокомплект на самолет Ил-114-300 (№ 0110).

Проведено сравнение технических требований, предъявляемых к ЗПП для самолетов Ил-96-300 и Ту-214 [5, 15] (табл. 3), и результатов, полученных НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Можно сделать вывод, что при принятии соответствующего решения разработчиком ЗПП разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ могут быть применены в конструкции данных самолетов.

Рассматривая в целом ситуацию с ЗПП, которые используются в качестве настила пола и не интегрированы в силовую схему самолета, можно утверждать, что на рынке присутствует конкуренция. Требования разработчиков, предъявляемые к ЗПП, максимально схожи (с небольшими допущениями). В итоге как минимум пять организаций могут поставлять ЗПП, соответствующие требованиям разработчиков самолетов SSJ-100/SSJ-NEW, Ту-214, Ил-114-300, Ил-96-300, ТВРС-44 «Ладога». Решение вопроса о применимости ЗПП того или иного поставщика остается за заказчиком, который будет учитывать прежде всего ценовую политику, локализацию и производственные мощности, наличие в конструкции максимального количества отечественных компонентов.

Ситуация с ЗПП для самолета МС-21-300 более сложная. В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют ЗПП с характеристиками, которые обеспечили бы возможность выполнить требования разработчика к панелям пола для данного воздушного судна. При проектировании самолета данные ЗПП предполагалось получать из-за рубежа. Разработчик ориентировался на ЗПП компании The Gill Corporation (США) [18].

Анализ данных показывает, что требования к панелям пола самолета МС-21-300, предъявляемые в 2015 г., полностью соответствуют показателям продукции компании The Gill Corporation, в частности показателям панелей марок Gillfloor 4709, Gillfloor 4809, Gillfloor 4417 и Gillfab 4223. За 10 лет технические требования претерпели незначительные изменения в сторону смягчения, однако по-прежнему остаются одними из самых «жестких» по сравнению с требованиями других разработчиков воздушных судов в Российской Федерации.

Стратегические направления развития разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ нацелены на решение проблемы импортозамещения и создания перспективных материалов с улучшенными показателями, не уступающих лучшим зарубежным материалам-аналогам и обеспечивающих главные потребности отечественного авиастроения. Возможным решением задачи по импортозамещению панелей пола салона самолета и БГО станет реализация мероприятия «Разработка комплекса материалов и технологий их изготовления для конструкций заготовок панелей пола салона самолета и заготовок боковых, потолочных панелей и панелей пола багажно-грузового отсека, соответствующих требованиям авиационных правил АП-25»,

проводимого в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства» [19, 20].

Обсуждение и заключения

Исходя из изложенного, можно утверждать, что для обеспечения самолета МС-21-300 ЗПП необходимо решить технически сложные задачи, главная из которых – разработка комплекса ПКМ и панелей пола салона самолета и БГО на их основе. При этом необходимо учесть множество факторов, связанных с материаловедческими и технологическими вопросами. Этим проблемам будет посвящена вторая часть данной работы.

Необходимо уточнить, что в сложившейся ситуации нельзя забывать о более 800 воздушных судов иностранного производства, где также используются как силовые, так и несилловые панели пола. В процессе эксплуатации панели пола выходят из строя и требуют замены. В настоящее время этой проблемой озадачены ведущие авиакомпании страны: ПАО «Аэрофлот», АО «Авиакомпания «Сибирь», АО «Россия» и др. Вопрос внедрения отечественных панелей пола в конструкцию иностранных воздушных судов, соответствующих спецификациям BMS и AIMS, остается открытым и в компетенции данных компаний, так как они обладают сертификатом разработчика авиационной техники ФАП-21J с расширенными полномочиями, позволяющими разрабатывать модификации и проводить нестандартные ремонты воздушных судов и конструктивных элементов самолетов.

Работа проведена 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 04.07.2023 об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства» [19].

Список источников

1. Самойлов И.А., Лесничий И.В., Самойлов В.И., Кипчарский Д.А. Состояние и перспективы развития парка воздушных судов гражданской авиации России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 9–16.
2. Распоряжение правительства Российской Федерации от 25 июля 2022 г. № 1693-р «Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года». URL: <http://government.ru/docs/all/141773/> (дата обращения: 12.08.2025).
3. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
4. Шокин Г.И., Шершак П.В., Андрюнина М.А. Опыт разработки и освоения производства сотовых панелей пола ЛА из отечественных материалов // Авиационная промышленность. 2017. № 1. С. 32–39.
5. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 198–213.

6. Фейгенбаум Ю.М., Бутушин С.В., Божевалов Д.Г., Соколов Ю.С. Композиционные материалы и история их внедрения в авиационные конструкции // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 7 (318). С. 24–37.
7. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3 (24). С. 56–63.
8. Душин М.И., Ермолаев А.М., Катырев И.Я. и др. Углепластики в панелях пола трехслойной конструкции // Авиационная промышленность. 1978. № 6. С. 8–12.
9. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швеиц Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 498–507.
10. Комаров В.А., Куцевич К.Е., Павлова С.А., Тюменева Т.Ю. Оптимизация трехслойных сотовых панелей пола из полимерных композиционных материалов пониженной горючести на основе высокопрочных углеродных и стеклянных волокон и клеевого связующего // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. № 3. С. 51–72.
11. Комаров В.А., Павлова С.А. Учет требований жесткости при проектировании трехслойных конструкций панелей пола самолета из высокопрочных композиционных материалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. № 2. С. 45–52.
12. 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.
13. 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: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
14. Flitelam UNS2 Technical Data // Yumpu: офиц. сайт. URL: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/52337885/aim-composites-ltd-flitelam-uns2-technical-data-lindberg-lund-as> (дата обращения: 04.09.2025).
15. Ильюшенков С.Ф., Батизат Д.В., Середута П.И. Разработка трехслойных сотовых панелей пола пассажирских самолетов из полимерных композитов // Полимерные материалы. 2025. № 3 (310). С. 14–21.
16. 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: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
17. Сарычев И.А., Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Термореактивные связующие для материалов панелей пола летательных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
18. Product Data Sheets // The Gill Corporation: офиц. сайт. URL: <https://www.thegillcorp.com/product/> (дата обращения: 04.09.2025).
19. Распоряжение правительства Российской Федерации от 04 июля 2023 г. № 1789-р «Комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства». URL: <http://government.ru/docs/all/148638/> (дата обращения: 16.10.2025).
20. 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: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

References

1. Samoilov I.A., Lesnichy I.V., Samoilov V.I., Kipcharsky D.A. Status and Development Prospects of the Russian Civil Aviation Fleet. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2014, no. 4 (315), pp. 9–16.
2. Order of the Government of the Russian Federation of July 25, 2022 No. 1693-r «Comprehensive Program for the Development of the Air Transport Industry of the Russian Federation until 2030». Available at: <http://government.ru/docs/all/141773/> (accessed: August 12, 2025).
3. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Barannikov A.A. Modern materials for the aircraft cabin. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), pp. 33–42. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 26, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42.
4. Shokin G.I., Shershak P.V., Andryunina M.A. Experience in the Development and Implementation of Production of Aircraft Honeycomb Floor Panels from Domestic Materials. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2017, no. 1, pp. 32–39.
5. Barannikov A.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the Production of PCM Floor Panels for Aircraft (review article). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 4 (2), pp. 198–213.
6. Feigenbaum Yu.M., Butushin S.V., Bozhevalov D.G., Sokolov Yu.S. Composite Materials and the History of Their Implementation in Aircraft Structures. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2015, no. 7 (318), pp. 24–37.
7. Barbotko S.L., Kirillov V.N., Shurkova E.N. Fire safety evolution for polymer composites of aeronautical application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 3, pp. 56–63.
8. Dushin M.I., Ermolaev A.M., Katyrev I.Ya. et al. Carbon fiber-reinforced plastics in floor panels of three-layer construction. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 1978, no. 6, pp. 8–12.
9. Strelnikov S.V., Petukhov V.I., Postnov V.I., Shvets N.I. New solutions in the technology of manufacturing prepregs for interior panels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4 (2), pp. 498–507.
10. Komarov V.A., Kutsevich K.E., Pavlova S.A., Tyumeneva T.Yu. Optimization of Three-Layer Honeycomb Floor Panels Made of Low-Combustibility Polymer Composite Materials Based on High-Strength Carbon and Glass Fibers and an Adhesive Binder. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2020, no. 3, pp. 51–72.
11. Komarov V.A., Pavlova S.A. Consideration of Stiffness Requirements in the Design of Three-Layer Aircraft Floor Panel Structures Made of High-Strength Composite Materials. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2021, no. 2, pp. 45–52.
12. 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.
13. 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), pp. 51–60. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-51-60.
14. *Flitelam UNS2 Technical Data*. Available at: <https://www.yumpu.com/pt/document/view/52337885/aim-composites-ltd-flitelam-uns2-technical-data-lindberg-lund-as> (accessed: September 04, 2025).
15. Ilyushenkov S.F., Batizat D.V., Sereduta P.I. Development of three-layer honeycomb floor panels for passenger aircraft made of polymer composites. *Polimernye materialy*, 2025, no. 3 (310), pp. 14–21.
16. 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 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
17. Sarychev I.A., Serkova E.A., Khmelnitsky V.V., Zastrogina O.B. Thermosetting binders for aircraft floor panel materials (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.

18. *Product Data Sheets*. Available at: <https://www.thegillcorp.com/product/> (accessed: September 04, 2025).
19. *Order of the Government of the Russian Federation dated July 4, 2023 No. 1789-r «Comprehensive scientific and technical program for the full innovation cycle «New composite materials: design and production technologies»*. Available at: <http://government.ru/docs/all/148638/> (accessed: October 16, 2025).
20. 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), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

Информация об авторах

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

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Галиуллин Антон Рашидович, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Evgeniy A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Anton R. Galiullin, First Category Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 26.11.2025.

The article was submitted 20.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 26.11.2025.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ВПЗ-25 ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ СОТОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Копылов¹, А.В. Коваленко¹, Н.К. Сидельников¹, А.О. Курносов¹, А.В. Славин¹

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

Аннотация. Приведены результаты исследования характеристик и микроструктуры образцов полимерного синтактного заполнителя холодного отверждения марки ВПЗ-25. По результатам испытаний образцов выполнены сравнительный анализ характеристик заполнителя ВПЗ-25 с характеристиками зарубежного аналога полимерного заполнителя холодного отверждения, а также отработка технологии заполнения сотовых панелей полимерным заполнителем ВПЗ-25. Выбраны оптимальные режимы отверждения.

Ключевые слова: авиационная техника, полимерный заполнитель ВПЗ-25, сферопластик, стеклянные микросферы, эпоксидное связующее, сотовые панели, полимерные композиционные материалы

Для цитирования: Копылов А.В., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Курносов А.О., Славин А.В. Исследование характеристик полимерного заполнителя холодного отверждения ВПЗ-25 для заполнения сотовых панелей элементов авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.

Scientific article

STUDYING THE CHARACTERISTICS OF VPZ-25 COLD-CURING POLYMER FILLER AND DEVELOPING A TECHNOLOGY FOR FILLING HONEYCOMB PANELS FOR AIRCRAFT COMPONENTS

A.V. Kopylov¹, A.V. Kovalenko¹, N.K. Sidelnikov¹, A.O. Kurnosov¹, A.V. Slavin¹

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

Abstract. This paper presents the results of a study of the characteristics and microstructure of samples of cold-curing polymer syntactic filler grade VPZ-25. Based on the results of testing the samples, a comparative analysis of the characteristics of VPZ-25 with the characteristics of a foreign analogue of cold-curing polymer filler was performed. Based on the results of preliminary testing of VPZ-25, a technology for filling honeycomb panels with VPZ-25 polymer filler for aircraft components was developed under various conditions.

Keywords: aviation technique, VPZ-25 polymer filler, spheroplastic, glass microspheres, epoxy binder, honeycomb panels, polymer composite materials

For citation: Kopylov A.V., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Studying the characteristics of VPZ-25 cold-curing polymer filler and developing a technology for filling honeycomb panels for aircraft components. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-37-52.

Введение

В авиационной промышленности первостепенное значение при создании новой авиационной техники придается облегчению конструкций, которые применяются как для планера, так и для интерьера, т. е. снижению массы одновременно с увеличением их прочности и жесткости. Один из путей достижения этих целей – активное использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях воздушных судов [1–10].

В элементах авиационной техники для местного упрочнения панелей сотовых конструкций необходимо применять полимерный наполнитель-сферопластик. Несущие слои трехслойных сотовых конструкций (как и любые однородные пластины) в основном рассчитаны на распределенные по поверхности нагрузки, а при воздействии сосредоточенных нагрузок требуется соответствующее усиление (упрочнение). Существует также определенный класс трехслойных сотовых панелей с полимерным наполнителем, на которые в различных точках действуют сосредоточенные нагрузки [11–16], с помощью которых осуществляется воздействие, в том числе ударное [1]:

- на элементы трехслойных сотовых конструкций интерьера воздушного судна (элементы отделки фюзеляжа, бытовые блоки и т. д.), применяющиеся в качестве несилочных элементов [10];

- на трехслойные сотовые панели пола, используемые в качестве силовых элементов [1, 10–12].

К элементам трехслойных сотовых конструкций авиационного интерьера и панелей пола современных воздушных судов предъявляются достаточно жесткие требования:

- элементы сотовых конструкций должны иметь минимальную массу при соблюдении достаточно высоких требований к физико-механическим характеристикам и соответствовать нормам огнестойкости по АП-25.853 и т. д. [17];

- сотовые панели пола должны быть легкими, долговечными (с ресурсом не менее 10 тыс. летных часов), выдерживать достаточно высокие нагрузки с минимально допустимым прогибом, соответствовать нормам летной годности по горючести и т. д. [18].

В трехслойных сотовых конструкциях в качестве наполнителей используют различные материалы, обеспечивающие высоту разнесения обшивок. Широкое применение находят наполнители в виде сотовых структур (рис. 1), которые изготавливают из полимерных материалов: сотопласты на основе термореактивных и термопластичных связующих; стекло-, угле- и органосотопласты; полимерные сотопласты на основе бумаги из ароматического полиамида и т. д. Свойства наполнителей в виде сотовых структур определяются их плотностью, формой и размером ячеек, толщиной сотовых блоков.

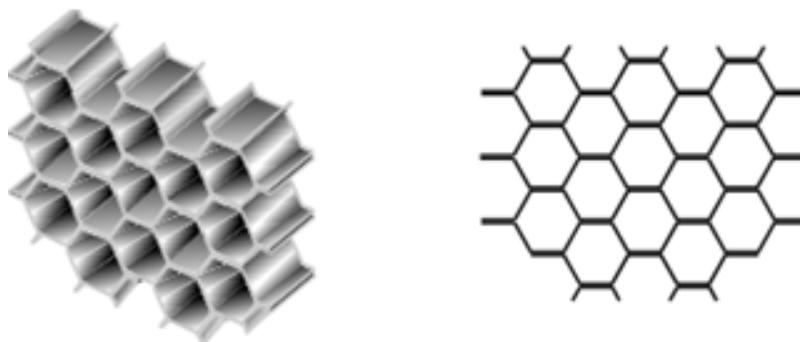
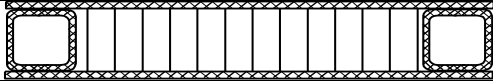
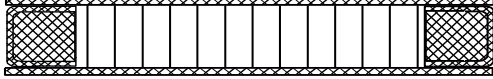
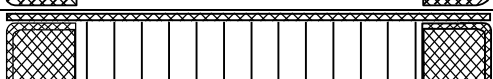
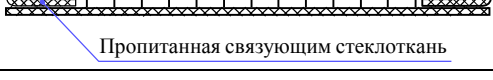


Рис. 1. Заполнитель в виде сотовых структур с гексагональной ячейкой

Таблица 1

**Типовые варианты сечений и зоны установки в конструкции авиационной техники
трехслойных сотовых панелей, в сотах которых планируется применить
сферопластик ВПЗ-25**

Форма поверхности обшивок	Эскизы типовых сечений	Зоны установки
Плоская		Панели пола
Плоская, одинарной кривизны		Панели пола, силовые откидные панели
Плоская, двойной или одинарной кривизны		Панели пола, крышки люковых проемов
Плоская с линейчатыми перегибами, одинарной кривизны	 Пропитанная связующим стеклоткань	Перегородки в салонах, сиденья и спинки сидений диванов в салонах
Плоская	 Упругая прокладка (приблизительно 1–2 слоя стеклотрикотажа)	Панели полов в кабинах пилотов и пассажирских отсеках

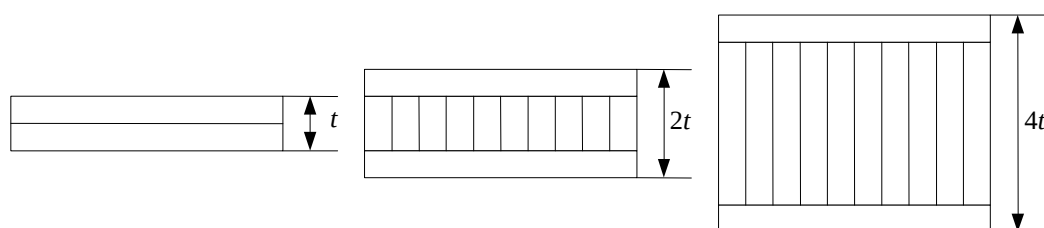


Рис. 3. Типовые варианты сечений сотовых панелей с регулируемыми высотами за счет применения сферопластика ВПЗ-25

В процессе эксплуатации авиационной техники к данным типовым вариантам сечений сотовых панелей с регулируемыми высотами при их упрочнении сферопластиком ВПЗ-25 предъявляются следующие требования:

- сохранение заданного контура при восприятии определенного уровня силовых нагрузок;
- сохранение несущей способности при их использовании в панелях пола кабин пилотов и пассажирских отсеков, в элементах конструкций авиационного интерьера.

Цель исследования – необходимость подтверждения характеристик композиции ВПЗ-25, зафиксированной на уровне состава, процессов ее изготовления, свойств и др. [19].

Для достижения данной цели необходимо провести:

- микроструктурные исследования скола сферопластика ВПЗ-25;
- исследования характеристик (плотность и прочность при сжатии при различных температурах) на образцах сферопластика ВПЗ-25;
- сравнительный анализ значений характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного аналога при различных температурах;
- отработку технологии заполнения сферопластиком ВПЗ-25 сотовых панелей с целью их упрочнения для элементов авиационной техники.

Объекты и методы исследования

Для исследований характеристик сферопластика ВПЗ-25 и отработки технологии изготовления сотовых панелей для элементов авиационной техники при упрочнении сот полимерным наполнителем ВПЗ-25 изготовлены:

- элементарные образцы сферопластика ВПЗ-25 в форме прямоугольного параллелепипеда для испытаний по определению плотности и прочности при сжатии;
- образцы сотовых панелей в форме прямоугольного параллелепипеда (рис. 4), заполненные полимерным наполнителем ВПЗ-25, для отработки технологии изготовления сотовых панелей.



Рис. 4. Образцы сотовых панелей, заполненные сферопластиком марки ВПЗ-25

До исследования характеристик сферопластика ВПЗ-25 и отработки технологии изготовления сотовых панелей, заполненных сферопластиком, проведены исследования микроструктуры образцов ВПЗ-25 методами световой и электронной сканирующей микроскопии при увеличениях от $\times 40$ до $\times 10000$.

Исследование характеристик сферопластика ВПЗ-25 проводили на элементарных образцах, которые отличались друг от друга линейными размерами. Для образцов полимерного наполнителя ВПЗ-25 проведены испытания по определению плотности и прочности при сжатии. Перечень видов испытаний образцов полимерного наполнителя ВПЗ-25, наименования характеристик и нормативные документы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики и нормативные документы по испытаниям образцов полимерного наполнителя ВПЗ-25

Характеристики (вид испытаний)	Единица измерения	Нормативная документация
Плотность	г/см ³	ГОСТ 15139–69
Прочность при сжатии при температурах –60, 20, 80 и 100 °С	МПа	ГОСТ 4651–2014
Температура стеклования	°С	ГОСТ Р 56753–2015

Испытания проводили в соответствии с нормативной документацией по соответствующим методикам.

Определение плотности проводили по ГОСТ 15139–69. Метод заключается в определении плотности вещества по отношению массы образца к его объему непосредственно взвешиванием и обмером. Объем образцов правильной геометрической формы (прямоугольный параллелепипед) определен путем вычисления по результатам его линейных замеров. Метод применяется для определения плотности (объемной массы) изделий и полуфабрикатов (стержни, бруски, трубы) и обеспечивает точность измерения плотности до 0,5 % при точности измерения объема 0,3 % и массы 0,2 %. Определение плотности сферопластика ВПЗ-25 проводили на образцах в количестве 10 шт. (без кондиционирования) при температуре $23,0 \pm 0,1$ °С.

Плотность вычисляли по формуле

$$\rho_t = \frac{M}{V},$$

где M – масса образца, г; V – объем образца при температуре измерения, см³.

Определение прочности при сжатии сферопластика ВПЗ-25 при температурах испытаний –60, 23±2, 80 и 100 °С проводили по ГОСТ 4651–2014. Образец помещали между опорными площадками универсальной испытательной машины так, чтобы его центральная вертикальная ось совпадала с центральной осью поверхностей опорных площадок. Перед испытаниями по определению прочности при сжатии выполнена проверка параллельности торцов образцов относительно поверхностей опорных площадок, а затем осуществлена настройка универсальной испытательной машины таким образом, чтобы поверхности торцов испытуемых образцов касались опорных площадок. В процессе испытания на сжатие образцов сферопластика ВПЗ-25 скорость их нагружения, равная скорости сближения опорных площадок универсальной испытательной машины, составила 5 мм/мин. Образец нагружали до разрушения и фиксировали максимальное значение нагрузки до разрушения.

Прочность при сжатии вычисляли по формуле

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

где F – нагрузка при сжатии, Н; A – первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм².

Испытания по определению температуры стеклования образца ВПЗ-25 проводили по ГОСТ 56723–2015 методом термомеханического анализа при определенных значениях постоянной скорости нагрева и статической нагрузки. Температуру стеклования образца полимерного наполнителя ВПЗ-25 определяли как точку пересечения касательных к кривой термомеханического анализа. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение результатов всех измерений.

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

Результаты и обсуждение

Результаты микроструктурных исследований, проведенных до испытаний на прочность при сжатии, скола сферопластика ВПЗ-25 методами световой и электронной сканирующей микроскопии при увеличениях от ×40 до ×10000 показали (рис. 5), что:

- в объеме образца хаотично распределены полые стеклянные микросферы, представляющие собой дисперсные сыпучие порошки, состоящие из отдельных тонкостенных сферических частиц. Размеры диаметра тонкостенных сферических частиц, получаемых при высокотемпературном нагреве измельченного стекла, находятся в диапазоне от 20 до 120 мкм (основная масса частиц имеет диаметр от 30 до 60 мкм). Поверхность микросфер гладкая, структура материала характеризуется высокой плотностью упаковки наполнителей;

- в объеме сферопластика ВПЗ-25 встречается небольшое количество разрушенных микросфер, а также хорошо заметны частицы неправильной формы – порошкообразные наполнители;

- при изготовлении скола образца на границе кристаллической частицы и матрицы образуется микротрещина;

- дисперсные наполнители в объеме сферопластика ВПЗ-25 распределены равномерно и одновременно с высоким уровнем адгезии к полимерной основе;

– следует отметить высокий уровень адгезионной прочности полимерной основы (матрицы) к поверхности микросфер, что характеризуется монолитной границей раздела между ними.

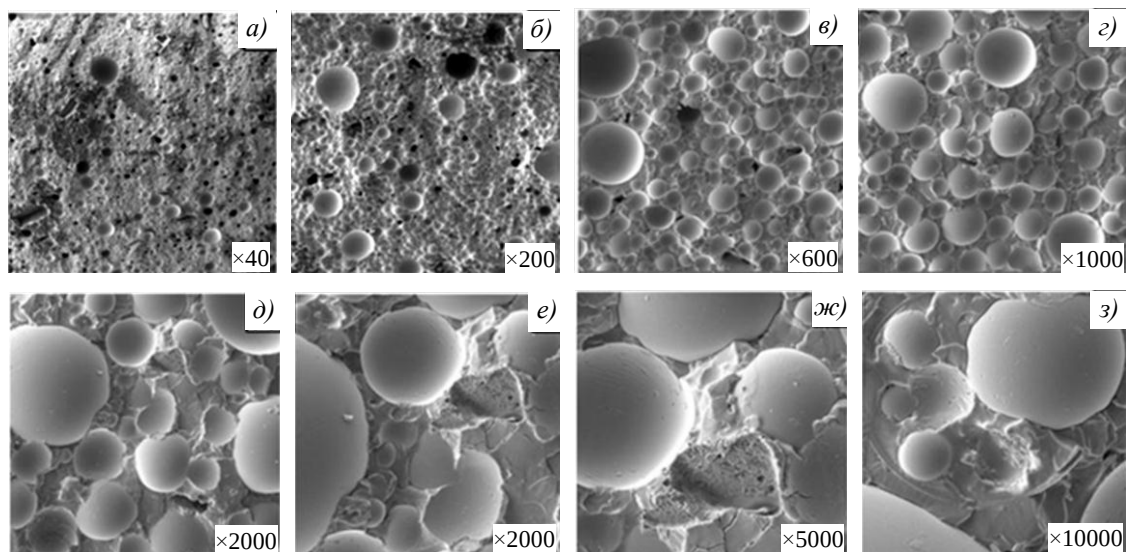


Рис. 5. Микроструктуры скола сферопластика ВПЗ-25

Результаты испытаний по определению плотности и прочности при сжатии элементарных образцов сферопластика ВПЗ-25 при температурах от -60 до $+80$ °С, а также до $+100$ °С, соответствующих диапазону температур на этапе эксплуатации сотовых конструкций авиационной техники, а также результаты сравнительного анализа значений характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного аналога [20] представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Определение плотности образцов сферопластика ВПЗ-25

Условный номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение
Плотность, г/см ³	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64	0,65	0,65	0,64	0,63	0,63

Таблица 4

Сравнение значений показателей образцов сферопластика ВПЗ-25 со значениями показателей зарубежного аналога при различных температурах испытаний

Показатель	Значения показателей сферопластика	
	ВПЗ-25*	Epoicast 1618-D/B (США)
Плотность, г/см ³	<u>0,62–0,65</u> 0,63	0,70
Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С:		
–60	<u>60–74</u> 69	–
23±2	<u>41–53</u> 49	35
80	<u>5,2–8,6</u> 7,2	3
100	<u>3,8–4,6</u> 4,1	–

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

Видно, что значение плотности сферопластика ВПЗ-25 меньше значения плотности зарубежного материала-аналога Erocacst 1618-D/B фирмы Huntsman (США), но в то же время значения прочности при сжатии при температурах 23 ± 2 и $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ превосходят аналогичные значения прочности при сжатии представленного материала-аналога Erocacst 1618-D/B.

С целью оценки разброса результатов испытаний для совокупности образцов сферопластика ВПЗ-25 производили статистическую обработку значений плотности и прочности при сжатии, полученных при различных температурах испытаний: -60 , 23 ± 2 , 80 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчет разброса значений результатов испытаний для совокупности образцов сферопластика ВПЗ-25 осуществляли по следующим формулам:

- среднее арифметическое (математическое ожидание)

$$\bar{X}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i,$$

где $\sum_{i=1}^n X_i$ – сумма измерений значений плотности; n – количество образцов;

- среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}};$$

- коэффициент вариации

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%.$$

Значения параметров статистической обработки плотности и прочности при сжатии, характеризующие разброс измерений, для образцов сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытаний – коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Значения физико-механических характеристик сферопластика ВПЗ-25 при различных температурах испытаний представлены на рис. 6 и 7.

Таблица 5

Значения параметров статистической обработки значений плотности образцов сферопластика ВПЗ-25 в количестве 10 шт. при температуре воздуха в помещении $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

Математическое ожидание значений плотности, г/см^3	Среднеквадратическое отклонение значений плотности, г/см^3	Коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), %	Оценка меры разброса данных по пороговым значениям коэффициента вариации 10, 20 и 33 %
0,634	0,01	1,609	При $<10\%$ изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при $<33\%$ – совокупность данных значений считается однородной

Таблица 6

**Значения параметров статистической обработки значений прочности
при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25 в количестве 5 шт. при различных
температурах испытаний**

Температура испытания, °C	Математическое ожидание значений прочности при сжатии, МПа	Среднеквадратическое отклонение значений прочности при сжатии, МПа	Коэффициент вариации (относительное стандартное отклонение), %	Оценка меры разброса данных по пороговым значениям коэффициента вариации 10, 20 и 33 %
23±2	48,6	4,27	8,78	При <10 % изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной
–60	68,6	4,67	6,81	
80	7,22	1,27	17,68	При >10 %, но <20 % – изменчивость вариационного ряда данных значений относится к средней; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной
100	4,08	0,33	8,11	При <10 % изменчивость вариационного ряда данных значений считается незначительной; при <33 % – совокупность данных значений считается однородной

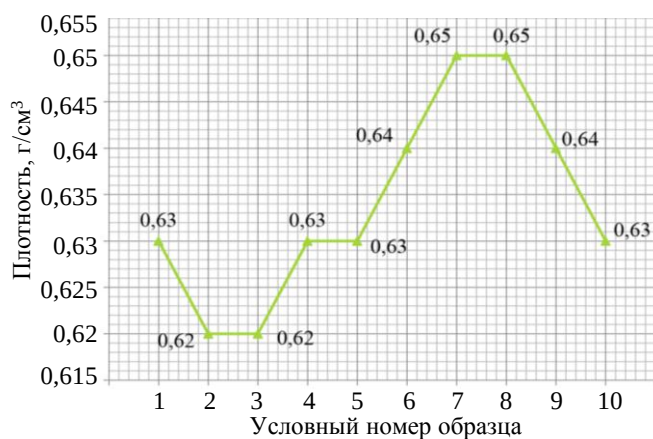


Рис. 6. Значения плотности образцов сферопластика ВПЗ-25 при температуре воздуха в помещении 23±2 °C

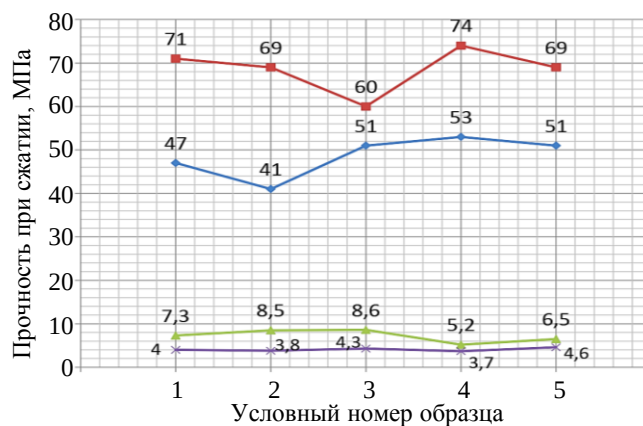


Рис. 7. Значения прочности при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25 при температурах –60 (■), 23 (◆), 80 (▲) и 100 °C (×)

Сравнительный анализ динамики изменения прочности при сжатии по средним значениям для сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B (США) в зависимости от роста температуры испытаний без учета временного фактора приведен на рис. 8. Температурная зависимость скорости снижения прочности при сжатии по средним значениям носит линейный характер. При росте температуры испытания значение скорости снижения прочности при сжатии для сферопластика ВПЗ-25 на 31 % меньше значения аналогичной характеристики для сферопластика Erocacst 1618-D/B, что свидетельствует об остаточной прочности сферопластика ВПЗ-25 (по сравнению со сферопластиком Erocacst 1618-D/B) при повышенных температурах 80–100 °С. Значения скоростей снижения прочности при сжатии сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B при росте температуры испытания определяли по коэффициентам наклона (угловым коэффициентам) линий регрессии, аппроксимирующих экспериментальные данные.

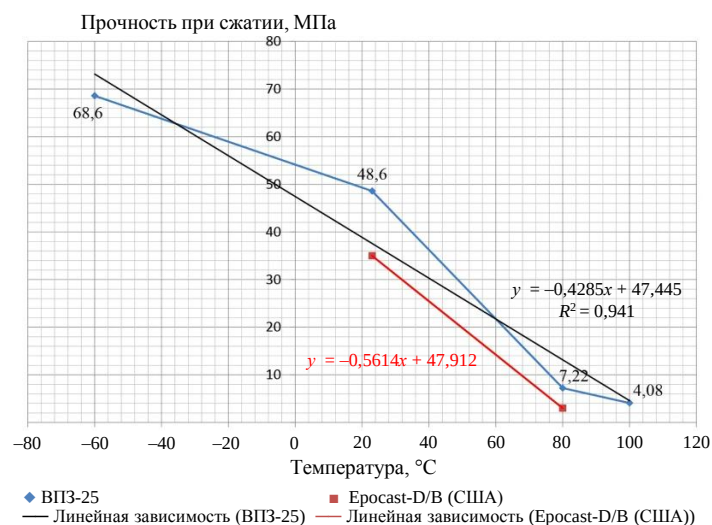


Рис. 8. Сравнительная динамика (по среднему значению) прочности при сжатии образцов из сферопластиков ВПЗ-25 и Erocacst 1618-D/B (США) от воздействия температуры испытаний

С целью отработки технологии заполнения сотовых панелей изготовлены образцы сотовой панели, заполненные сферопластиком ВПЗ-25 (рис. 4).

Заполнение сотовых панелей проводили путем введения композиции сферопластика ВПЗ-25 в участки сотовой конструкции с помощью шприца с винтовой подачей, состоящего из пуансона, корпуса и шпателя (с широкой и узкой стороной для различных участков). Перемешивание компонентов композиции, представляющей собой пастообразную и вязкотекучую массу, проводили до образования однородных массы и цвета (готовая композиция пригодна к применению в течение не более 2 ч). Однородность цвета композиции служит индикатором равномерности совмещения компонентов, что гарантирует полное протекание реакции отверждения без образования подтеков на заполненной сотовой панели после 24 ч отверждения. Полимерные соты, заполненные композицией сферопластика ВПЗ-25 до его отверждения, представлены на рис. 9.

Результаты визуального исследования показали, что образцы сотовых панелей, заполненные сферопластиком ВПЗ-25, имеют однородную структуру заполнения. В композиции сферопластика ВПЗ-25 отсутствуют включения и непромесы в виде несмоченных полимерной основой дисперсных наполнителей. Ячейки сотового заполнителя заполнены равномерно без образования пустот и расслоений, что подтверждается отсутствием таковых на поперечных срезах сотовой панели.

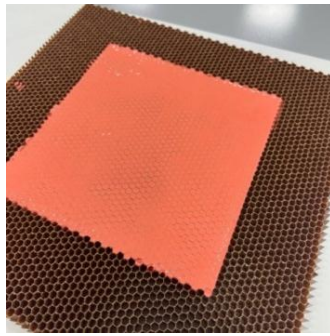


Рис. 9. Полимерные соты, заполненные композицией сферопластика ВПЗ-25 до его отверждения

Для выбора оптимальных технологических режимов заполнения и возможности совместного формования с другими ПКМ, применяемыми в панелях интерьера авиационной техники, а также для сокращения продолжительности отверждения полимерного заполнителя ВПЗ-25 проведены исследования по подбору режимов отверждения как при комнатной температуре, так и при температурах ступенчатого нагрева до 100 °С и больше (табл. 7).

Таблица 7

Результаты исследований образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденного по различным режимам

Свойства	Значения свойств для режимов отверждения					
	1	2	3	4	5	6
Плотность, г/см ³	<u>0,69–0,71</u> 0,70	<u>0,55–0,56</u> 0,56	<u>0,55–0,56</u> 0,56	<u>0,29–0,50</u> 0,39	<u>0,54–0,56</u> 0,55	<u>0,60–0,62</u> 0,61
Прочность при сжатии, МПа, при температуре, °С:						
	<u>29,0–34,5</u> 32,1	<u>56,0–59,0</u> 57,7	<u>37,5–44,0</u> 38,6	<u>12,0–28,0</u> 18,0	<u>32,0–37,5</u> 34,0	<u>41,0–47,5</u> 44,5
	<u>18,5–21,5</u> 20,2	<u>13,0–17,5</u> 15,0	<u>13,0–19,5</u> 16,5	<u>10,0–19,0</u> 13,5	<u>16,5–22,0</u> 19,0	<u>18,0–30,0</u> 25,5
Температура стеклования, °С	76	68	74	71	71	67
Примечание. В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – среднее арифметическое.						

По результатам исследований выбрано три оптимальных режима отверждения (2, 3, 6) сферопластика ВПЗ-25.

Сравнительный анализ физико-механических характеристик образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по различным режимам, приведен на рис. 10–12.

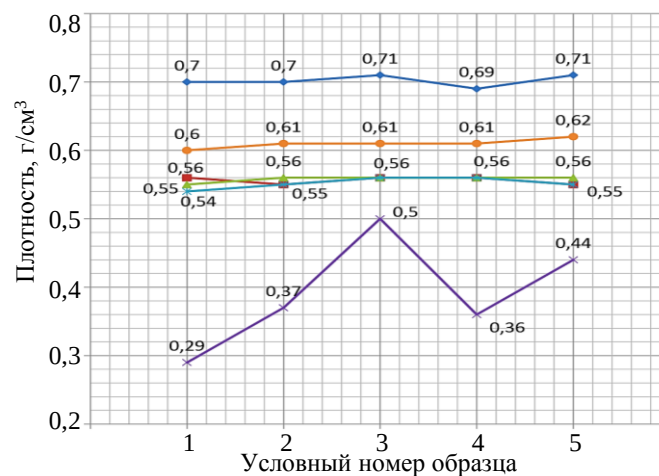


Рис. 10. Сравнительный анализ значений плотности образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (◆), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (✱) и 6 (●)

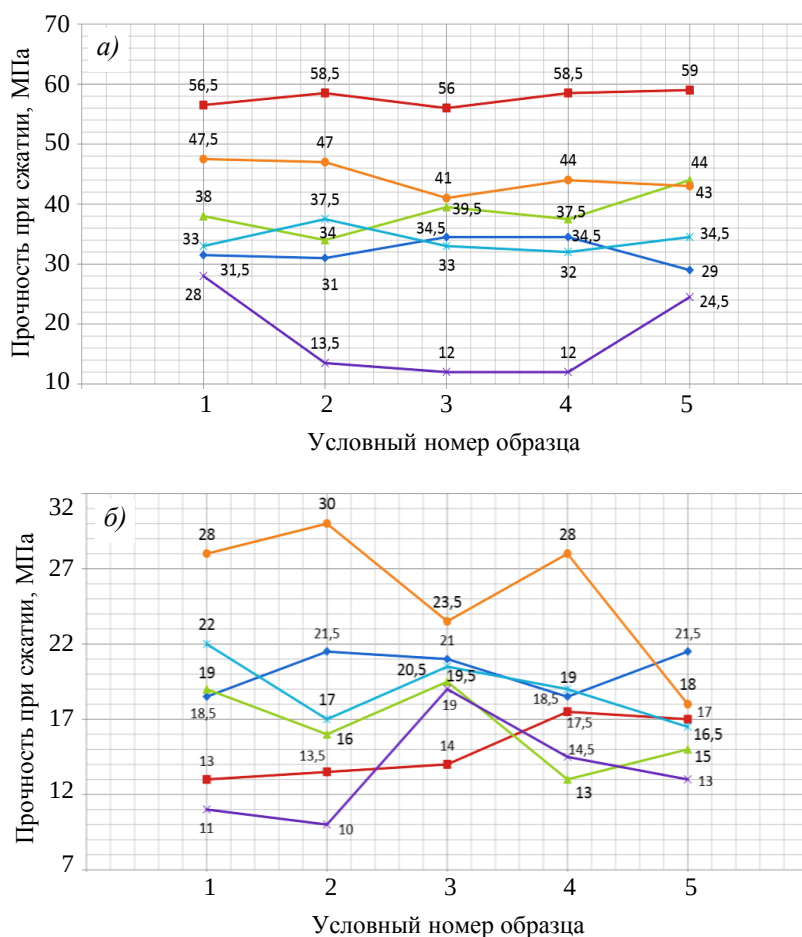


Рис. 11. Сравнительный анализ значений прочности при сжатии при температурах 23 ± 2 (а) и 80 °С (б) образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (♦), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (✱) и 6 (●)

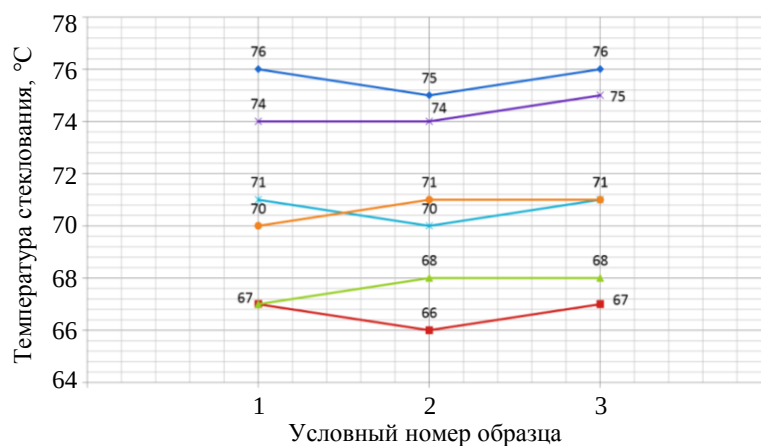


Рис. 12. Сравнительный анализ значений температуры стеклования образцов сферопластика ВПЗ-25, отвержденных по режимам 1 (♦), 2 (■), 3 (▲), 4 (×), 5 (✱) и 6 (●)

С учетом применения оптимальных режимов отверждения сферопластика ВПЗ-25 образец трехслойной сотовой панели с обшивками из стеклопластика для элементов авиационной техники, полученный в процессе совместного формования сферопластика ВПЗ-25 и препрега стеклопластика, представлен на рис. 13.

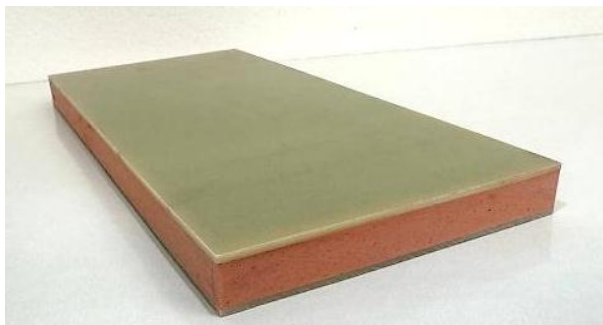


Рис. 13. Образец трехслойной сотовой панели со сферопластиком ВПЗ-25

Заключения

Исследованы образцы сферопластика ВПЗ-25 и получены следующие результаты:

- определены характеристики плотности и прочности при сжатии образцов сферопластика ВПЗ-25;
- в ходе статистической обработки и оценки меры разброса результатов испытаний установлено, что изменчивость вариационного ряда данных значений плотности и прочности при сжатии считается незначительной, а совокупность данных значений считается однородной;
- результаты исследования микроструктуры образцов сферопластика ВПЗ-25 показали высокий уровень адгезионной прочности полимерной основы (матрицы) к поверхности наполнителя в виде микросфер, что приводит к образованию монолитной границы раздела между ними.

Сравнительный анализ значений физико-механических характеристик сферопластика ВПЗ-25 со значениями характеристик зарубежного материала-аналога Erocast 1618-D/B фирмы Huntsman (США) при различных температурах показал, что значение плотности сферопластика ВПЗ-25 меньше значения плотности сферопластика Erocast 1618-D/B, но в то же время значения прочности при сжатии сферопластика ВПЗ-25 при температурах 23 ± 2 и 80 °С превосходят значения прочности при сжатии материала Erocast 1618-D/B в аналогичных условиях.

По результатам исследований выполнена отработка технологии заполнения сотовых панелей сферопластиком ВПЗ-25 и выбраны оптимальные режимы для сокращения времени отверждения сферопластика и возможности проведения формования элементов панелей авиационной техники за один технологический цикл совместно с обшивками из ПКМ.

Результаты исследования получены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (по соглашению № 075-11-2025-013 от 27.02.2025 г.) в рамках реализации комплексных научно-технических программ и проектов полного инновационного цикла (катализаторы и композиты).

Список источников

1. Шершак П.В. Рациональный выбор проектных решений при разработке конструкции пола из полимерных композиционных материалов для воздушных судов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2017. 20 с.
2. Сливинский В.И., Ткаченко Г.В., Сливинский М.В. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 3. С. 169–173.

3. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
4. Шершак П.В., Косарев В.А., Куриленко Н.В. Влияние высоты полимерного сотового заполнителя на жесткость трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2016. № 2. С. 49–52.
5. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
6. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринев Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
7. Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Цыкун Р.Г., Донецкий К.И. Конструкционная многослойная тканая преформа для изготовления фрагмента интегральной панели летательного аппарата // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
8. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
9. Сутубалов А.И., Подживотов Н.Ю., Шершак П.В., Яковлев Н.О. Оценка однородности физико-механических свойств полуфабрикатов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.11.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
11. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
12. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. М.: Машиностроение, 1982. 152 с.
13. Михайлин Ю.М. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 715 с.
14. Минаков В.Т., Постнов В.И., Швеи Н.И., Застрогина О.Б., Петухов В.И., Макрушин К.В. Особенности изготовления трехслойных сотовых панелей с полимерным заполнителем горячего отверждения // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 3. С. 6–9.
15. Шершак П.В., Шокин Г.И., Егоров В.Н. Технологические особенности производства трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // *Авиационная промышленность*. 2014. № 3. С. 34–42.
16. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
17. Ильюшенков С.Ф., Цветков В.Е., Середута П.И., Цветкова Н.Н. Современные конструкторско-технологические разработки элементов интерьера ЛА // *Полимерные материалы*. 2024. № 12. С. 36–42.
18. Ильюшенков С.Ф., Батизат Д.В., Середута П.И. Разработка трехслойных сотовых панелей пола пассажирских самолетов из полимерных композитов // *Полимерные материалы*. 2025. № 3 (310). С. 14–21.
19. Капустянская М.А., Любимова А.С., Коваленко А.В., Сидельников Н.К., Ткачук А.И., Славин А.В. Разработка полимерного синтактного заполнителя холодного отверждения с улучшенными физико-механическими характеристиками // *Труды ВИАМ*. 2024. № 11 (141). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.

20. Epocast 1618-D/B. Сайт компании Freeman Manufacturing & Supply. URL: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (дата обращения: 05.11.2025).

References

1. Shershak P.V. *Rational Selection of Design Solutions in Developing Aircraft Floor Structures from Polymer Composite Materials*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2017, 20 p.
2. Slivinsky V.I., Tkachenko G.V., Slivinsky M.V. Efficiency of Using Honeycomb Structures in Aircraft. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*, 2005, no. 3, pp. 169–173.
3. Alfutov N.A., Zinoviev P.A., Popov B.G. *Calculation of Multilayer Plates and Shells from Composite Materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 264 p.
4. Shershak P.V., Kosarev V.A., Kurilenko N.V. The influence of the height of the polymer honeycomb core on the rigidity of three-layer honeycomb floor panels of aircraft. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2016, no. 2, pp. 49–52.
5. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new-generation materials for complex technical systems. *Report of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
6. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 28.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
7. Belinis P.G., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Tsykun R.G., Donetskii K.I. Design research on a constructural multilayer woven preform of an integral panel fragment for aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 29, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-114-124.
8. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
9. Sutubalov A.I., Podzhivotov N.Yu., Shershak P.V., Yakovlev N.O. Evaluation of homogeneity of physical and mechanical properties of semi-finished products for aviation purpose. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
10. Panin V.F., Gladkov Yu.A. *Structures with Filler*: Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 272 p.
11. Endogur A.I., Weinberg M.V., Ierusalimsky K.M. *Honeycomb Structures. Selection of Parameters and Design*. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 200 p.
12. Panin V.F. *Structures with Honeycomb Filler*. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 152 p.
13. Mikhailin Yu.M. *Fibrous Polymer Composite Materials in Engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013, 715 p.
14. Minakov V.T., Postnov V.I., Shvets N.I., Zastrogina O.B., Petukhov V.I., Makrushin K.V. Features of the manufacture of three-layer honeycomb panels with a hot-curing polymer filler. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2009, no. 3, pp. 6–9.
15. Shershak P.V., Shokin G.I., Egorov V.N. Technological Features of the Production of Three-Layer Honeycomb Aircraft Floor Panels. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 3, pp. 34–42.
16. *Airworthiness standards for air-planes of the transport category: AP-25*: utv. Postanovleniyem 35-y sessii Soveta po aviatsii i ispolzovaniyu vozdušnogo prostranstva 23.10.2015. 5-ye izd. s popravkami 1–8. M.: Aviaizdat, 2015, 290 p.

17. Ilyushenkov S.F., Tsvetkov V.E., Sereduta P.I., Tsvetkova N.N. Modern design and technological developments of aircraft interior elements. *Polimernye materialy*, 2024, no. 12, pp. 36–42.
18. Ilyushenkov S.F., Batizat D.V., Sereduta P.I. Development of three-layer honeycomb floor panels for passenger aircraft made of polymer composites. *Polimernye materialy*, 2025, no. 3 (310), pp. 14–21.
19. Kapustianskaia M.A., Lyubimova A.S., Kovalenko A.V., Sidelnikov N.K., Tkachuk A.I., Slavin A.V. Development of a cold-curing polymer syntactic filler with enhanced physico-mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-33-43.
20. Epocast 1618-D/B. Available at: <https://freemansupply.com/products/liquid-tooling-materials/epoxy-aerospace-syntactics/epocast-1618-epoxy-syntactic> (accessed: November 05, 2025).

Информация об авторах

Копылов Алексей Васильевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Сидельников Николай Константинович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

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

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2025.
The article was submitted 28.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2025.

Научная статья

УДК 661.665.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕРМОСТОЙКОГО МАЛОУСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

В.В. Викулин¹, С.С. Гвоздев¹

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

Аннотация. Приводятся особенности и закономерности технологии получения высокотермостойкого малоусадочного карбида кремния в результате формирования в пористой структуре материала зон с различной теплопроводностью, а также за счет повышения прочности, устойчивости к окислению при температурах до 1600 °С и предотвращения восстановления SiO₂ карбидом кремния при высоких температурах.

Приведены зависимости плотности, линейной усадки и количества связки при формировании предварительно спеченных образцов керамики от удельной поверхности порошков карбида кремния. Показано влияние плотности предварительно спеченной керамики на прочность образцов при температурах 20, 1400 и 1500 °С. Приведены данные по влиянию пропитки кремнийорганическим соединением и высокотемпературной обработки образцов керамики в среде азота и на воздухе на повышение прочностных характеристик и стойкости керамики к окислению.

Ключевые слова: карбид кремния, спекание, кремнийорганическое соединение, азотирование, термодинамический расчет, газовый и вибрационный стенды

Для цитирования: Викулин В.В., Гвоздев С.С. Особенности получения высокотермостойкого малоусадочного материала на основе химически упрочненного карбида кремния // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62.

Scientific article

FEATURES OF OBTAINING A HIGHLY HEAT-RESISTANT LOW SHRINKAGE MATERIAL BASED ON CHEMICALLY STRENGTHENED SILICON CARBIDE

V.V. Vikulin¹, S.S. Gvozdev¹

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 features and regularities of the technology of obtaining highly heat-resistant low shrinkage silicon carbide by forming zones with different thermal conductivity in the porous structure of the material, increasing the strength and resistance to oxidation at temperatures up to 1600 °C, preventing the reduction of SiO₂ by silicon carbide at high temperatures.

The dependences of density, linear shrinkage and amount of binder during of pre-sintered ceramic samples on the specific surface of silicon carbide powders are presented. The effect of pre-sintered ceramic density on the strength of samples at temperatures of 20, 1400 and 1500 °C is demonstrated. Data are presented on the effect of impregnation of silicon carbide

with a silicon organic compound and high-temperature treatment of ceramic samples in a nitrogen environment and in air on increasing the strength characteristics and resistance of ceramics to oxidation.

Keywords: *silicon carbide, sintering, silicon organic compound, nitriding, thermodynamic calculation, gas and vibration stands*

For citation: Vikulin V.V., Gvozdev S.S. Features of obtaining a highly heat-resistant low shrinkage material based on chemically strengthened silicon carbide. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-53-62.

Введение

Успехи СССР в области разработки конструкционных и функциональных керамических материалов для газотурбинных и поршневых двигателей в конце 70-х – середине 80-х гг. прошлого столетия были неоспоримы и опережали европейские разработки.

Ученые, инженеры, конструкторы многих предприятий Советского Союза принимали активное участие в реализации разработок керамических материалов для различных двигателей. Были достигнуты успехи по разработке материалов на основе реакционносвязанного и самоармированного Si_3N_4 , сохраняющих прочность до 1400 °C на воздухе, а также материалов с повышенными термостойкостью и истираемостью или пониженной теплопроводностью, применительно к различным элементам и узлам газотурбинных и поршневых двигателей, подтвердивших работоспособность при температурах 1100–1400 °C в качестве элементов жаровой трубы камеры сгорания, сопловых и рабочих лопаток, истираемых надроторных уплотнений и других элементов [1, 2]. В меньшей степени уделялось внимание получению высокопрочной керамики на основе спеченных нитрида и карбида кремния. В то время решение многих задач сталкивалось с проблемой хрупкости керамических материалов, трудностью придания деталям сложной геометрической формы с помощью технологий горячего прессования и горячего изостатического прессования, а также отсутствием технологий механической обработки керамики, обладающей высокой твердостью. К середине 90-х гг. XX в. работы в направлении широкого применения керамики в адиабатных поршневых и газотурбинных двигателях были практически остановлены.

В настоящее время интерес российских конструкторов к применению керамических и керамоматричных композиционных материалов в двигателестроении возобновляется.

Спеченный карбид кремния имеет некоторые преимущества по сравнению с нитридом кремния из-за большей устойчивости при температурах до 1600 °C, но уступает ему по термостойкости из-за более высокого температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), больших усадок и высокой твердости, затрудняющей механическую обработку сложнопрофильных изделий. Плотная керамика на основе карбида кремния, полученная спеканием тонкодисперсных порошков карбида кремния или горячим прессованием с активаторами спекания при температурах до 1800–2000 °C, обладает высокой твердостью, абразивостойкостью и применяется в настоящее время как баллистический материал с подложкой из сверхвысокомолекулярного полиэтилена для защиты личного состава и техники [3]. Такие изделия из карбида кремния не могут эксплуатироваться при температурах 1500–1600 °C в условиях высоких темпов нагрева в различных деталях двигателей и других высокотемпературных устройствах, при которых в изделиях, особенно толстостенных, создаются высокие напряжения из-за больших градиентов температур.

Существуют технологии изготовления пористого или плотного карбида кремния, содержащего тугоплавкие добавки, такие как силициды молибдена, вольфрама, тантала, ниобия, германия, рения, а также добавки бора, графита, кремния, диборида циркония, алмаза и других элементов [4–8]. Несмотря на то что некоторые из них могут сохранять прочность до температуры 1500 °С и жаростойкость – до 2000 °С, такие материалы предназначены для использования в качестве абразивостойких инструментов при резании, бурении, обработке давлением, в качестве антифрикционных деталей машин, сопловых вкладышей, тиглей, фильтров или в условиях повышенных температур при медленных темпах нагрева. Некоторые из них начинают терять прочность при температуре 1300 °С. Такие материалы не могут применяться в качестве термостойких, в том числе из-за неустойчивости в окислительных средах, продуктах сгорания топлива и их большой стоимости за счет применяемых добавок. Из таких материалов трудно получать сложнопрофильные изделия без механической обработки.

Одним из материалов, сведения о технологии изготовления которого в предыдущих публикациях были недостаточно представлены, является высокотермостойкий малоусадочный карбид кремния. Имеются научно-технические публикации о некоторых свойствах данного материала без подробного объяснения технологии и результатов испытаний как материала, так и изделий [9–13].

В работе применялись: порошок зеленый карбида кремния, установка термопластичного литья под давлением, печи с электрическими и с графитовыми нагревателями. Прочностные испытания образцов при изгибе при температурах до 1400 °С на воздухе и вибрационные испытания проводились на нестандартном оборудовании [14].

Материалы и методы

В качестве исходного сырья при разработке материала использовали зеленый порошок карбида кремния зернистостью 20 мкм, содержащий 99,2 % карбида кремния. Дополнительный помол порошка проводили шарами из карбида кремния в шаровой мельнице, футерованной пластинами карбида кремния или оксида алюминия, до удельной поверхности 8000–11000 м²/г. При формовании образцов и заготовок изделий применяли термопластичную связку на основе воска и парафина. Формование осуществляли на нестандартном оборудовании при температуре 60 °С под давлением. После удаления связки из глинозема, выполняющего функцию адсорбента, образцы спекали в печи с графитовыми нагревателями при температурах до 1800–2000 °С в среде азота. Плотность образцов керамики определяли по ГОСТ 2409–85. Предел прочности при изгибе определяли в условиях кратковременного нагружения при комнатной температуре и при температурах 1400 и 1500 °С на нестандартном оборудовании. Коэффициент интенсивности напряжения K_{Ic} определяли по нестандартной методике «изгиб с надрезом». Термообработку образцов осуществляли в печах с металлическими и графитовыми нагревателями.

Результаты и обсуждение

Методом термопластичного литья под давлением можно получать детали сложного профиля, когда в зависимости от дисперсности порошка и температуры спекания линейная усадка керамики составляла 0,5–3,0 %, и изделия не требовали механической обработки, поскольку усадка при спекании была постоянной, а поверхность задавалась металлической формой для литья. При удалении связки из глинозема заготовки сохраняли геометрическую форму и целостность.

На рис. 1 представлена зависимость линейной усадки, плотности и количества связки от удельной поверхности порошка предварительно спеченного карбида кремния.

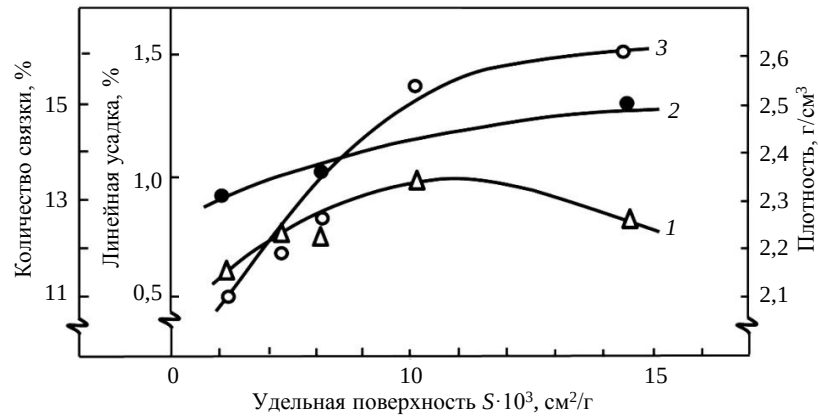


Рис. 1. Влияние удельной поверхности порошка карбида кремния на количество связки и свойства предварительно спеченной керамики: 1 – плотность; 2 – линейная усадка; 3 – количество связки

На рис. 2 показано влияние плотности предварительно спеченного карбида кремния на пористость и прочность керамики.

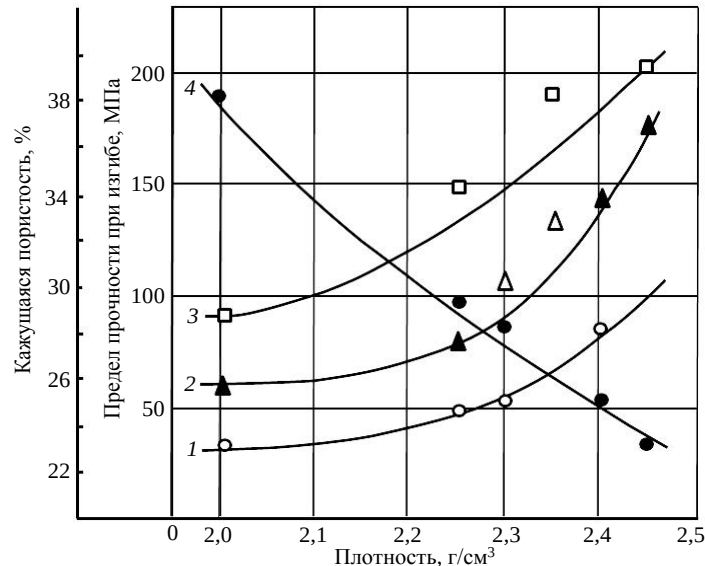


Рис. 2. Зависимость пористости (4) и прочности при температурах 1500 (1), 20 (2) и 1400 °C (3) предварительно спеченного карбида кремния от плотности

Спекание керамики происходило за счет самой тонкой фракции карбида кремния и незначительных технологических примесей оксида алюминия.

При температуре испытаний 1400 °C прочность образцов при изгибе превышает их прочность при комнатной температуре за счет достаточно высокой вязкости межзеренной фазы, ее пластичности, залечивания дефектов зерен, возможных микротрещин, сглаживания поверхностей пор и релаксации напряжений.

Для повышения прочности и стойкости к окислению предварительно спеченные образцы карбида кремния пропитывали тетраэтиловым эфиром ортокремневой кислоты (этилсиликатом), особенность которого заключалась в том, что в процессе термообработки при температурах до 1350–1400 °C в атмосфере азота происходила его диффузия к поверхности керамики, диссоциация до SiO_2 и образование Si_3N_4 в поверхностном слое карбида кремния при взаимодействии с азотом.

Предварительно проведенный термодинамический расчет (рис. 3) показал, что в присутствии карбида кремния и углерода при температурах до 1450 °С в азотсодержащей среде происходит восстановление SiO_2 с образованием нитрида кремния.

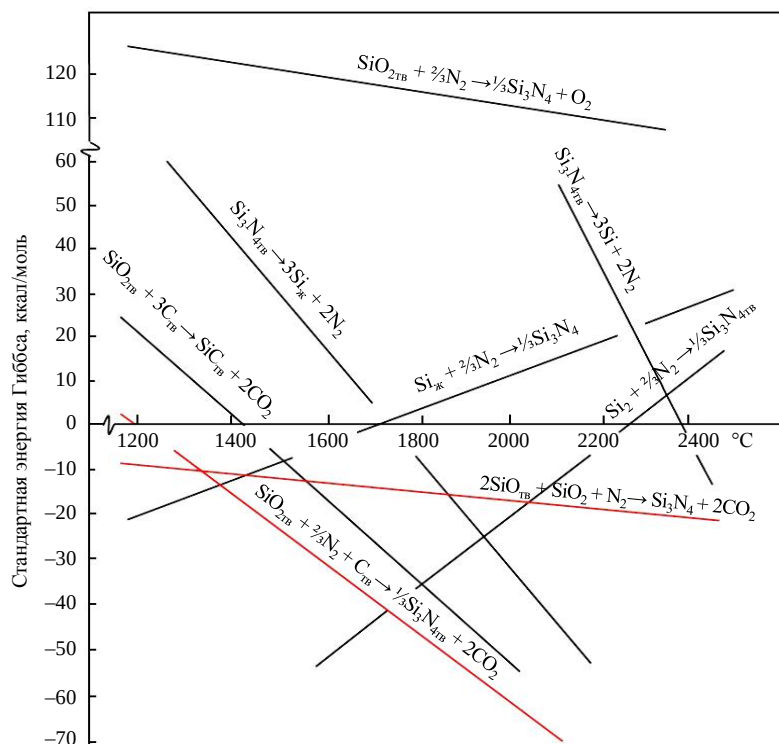


Рис. 3. Зависимость термодинамического потенциала в системе Si–O–C–N от температуры

Углерод, принимающий участие в реакции восстановления SiO_2 , присутствует в виде примесей в порошке карбида кремния и в виде остатка после удаления пластифицирующей связи.

Для защиты от окисления образцы керамики дополнительно пропитывали этилсиликатом и проводили кратковременную термообработку при температурах до 1300 °С на воздухе, в результате чего в поверхностном слое карбида кремния присутствовали $\alpha\text{-SiC}$, $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, SiO_2 и оксинитрид кремния Si_2ON_2 , наличие которых установлено рентгенофазовым анализом. После модификации теплопроводность пористого карбида кремния при температуре 50 °С снизилась с 10,0 до 7,4 Вт/(м·К).

На рис. 4 приведена микроструктура поверхности карбида кремния.

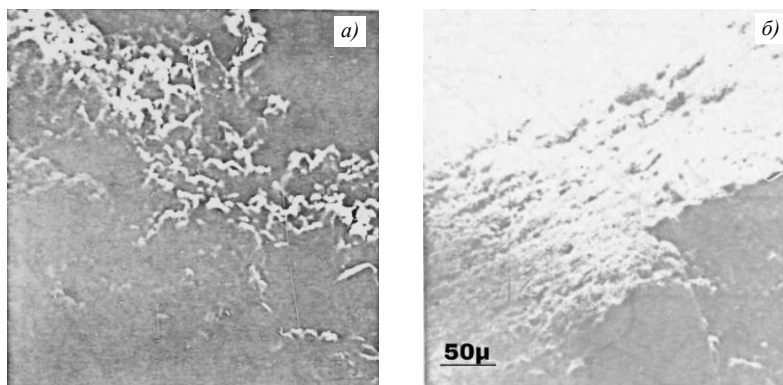


Рис. 4. Микроструктура поверхности керамики из карбида кремния после спекания (а) и химической модификации (б)

После проведения операций модифицирующей пропитки прочность керамики при изгибе при температуре 1400 °С на воздухе достигла 280 МПа при плотности 2,55 г/см³. Изменение массы макетных образцов керамики на воздухе при температуре 1300 °С в течение 50 ч составило 0,75 %.

На рис. 5 приведены зависимости изменения массы, плотности и прочности керамики после модифицирующих пропиток и термообработки от плотности предварительно спеченной керамики.

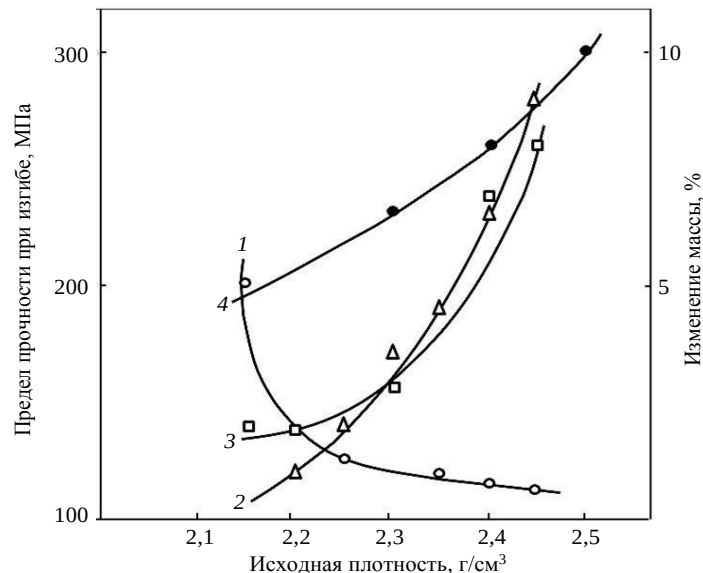


Рис. 5. Влияние плотности предварительно спеченного карбида кремния на свойства карбида кремния после его модификации: 1 – изменение массы; прочность при температурах 20 (2), 1500 (3) и 1400 °С (4)

Динамический модуль упругости керамики при температурах 20 и 1400 °С достигал 193 ГПа. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) в интервале температур 20–100 °С составлял $2,8 \cdot 10^{-6}$ и $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур 20–1500 °С.

Проведенные расчеты показали, что при температурах 1500–1600 °С карбид кремния восстанавливает SiO₂, что может приводить к снижению защитных свойств керамики. В данном случае нитрид и оксинитрид кремния, диффузионно связанные с карбидом кремния, являются промежуточной прослойкой, разделяющей карбид кремния и SiO₂, повышают вязкость стеклообразной пленки и препятствуют ее восстановлению и удалению с поверхности.

Предпринимались попытки защитить карбид кремния от окисления путем создания на поверхности керамики промежуточного слоя, который разделяет карбид кремния и SiO₂ и связывает диоксид кремния, появляющийся в результате диффузии кислорода через покрытие и окисляющий карбид кремния. В другом случае нитрид кремния и SiO₂ наносили на поверхность пористого карбида кремния с последующим спеканием. Данный материал предназначен для изготовления тиглей для высокотемпературной обработки стекла, хлор- и фосфорсодержащих соединений. Однако результаты испытаний обоих материалов при температурах от 1260 до 1380–1500 °С только косвенно подтверждают стойкость материалов к окислению [15, 16].

В другом патенте предлагается защищать карбид кремния травлением поверхности в щелочах и кислородсодержащих солях при температурах >400 °С или газообразным хлором при 800 °С с последующим нанесением на поверхность алюминия. Такой карбид кремния предназначен только для применения в полупроводниковой технике [17].

Керамические втулки топливных форсунок из разработанного материала (рис. 6) показали высокую работоспособность в условиях резких термических нагрузений, выдержав без разрушения 400 циклов нагрева и охлаждения топливом в секции камеры сгорания и на газотурбинном двигателе в газовых потоках с температурами 1100 и 1400 °С.

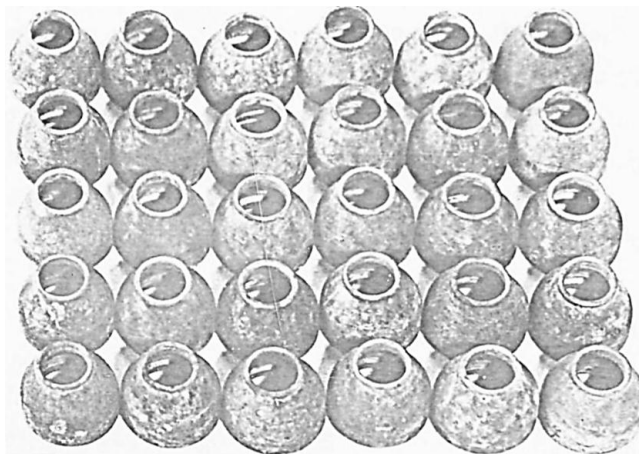


Рис. 6. Керамические втулки из карбида кремния для топливных форсунок

Десять втулок выдержали по 5–10 циклов нагрева в течение 30 с и охлаждения в течение 20 с на газодинамическом стенде, создающем на поверхности материала температуры 1550–1750 и 1220–1320 °С в разных зонах детали.

Крупногабаритные макетные образцы прошли термоциклические испытания на газодинамическом стенде с температурой в газовом потоке 1620 °С и охлаждением до комнатной температуры.

Высокая стойкость к термическому удару полученного материала может быть связана с его остаточной пористостью 20–15 % при плотности 2,4–2,7 г/см³, высоким значением трещиностойкости $K_{Ic} = 2,1–4,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при комнатной температуре и $K_{Ic} = 3,1–4,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ при температуре 1200 °С, а также с меньшей теплопроводностью поверхностного слоя керамики по сравнению с внутренним объемом материала, за счет чего образец может нагреваться равномерно, создавая однородное температурное поле, не приводящее к напряженно-деформированному состоянию, которое дополнительно может нивелироваться при создании сжимающих поверхностных напряжений.

Еще одной уникальной особенностью разработанного материала оказалась чрезвычайно высокая устойчивость тонкостенной втулки, установленной с помощью цангового крепления в составе форсунки, выдержавшей без разрушения на вибрационном стенде суммарно $15 \cdot 10^6$ циклов при нагрузках от 150 до 400 г, чему трудно найти объяснение в поведении хрупкого керамического материала.

Разработанная технология интересна еще и тем, что, применяя ее, можно создать высокотемпературный композиционный материал систем SiC–SiC и SiC–C_f. В первом случае в пористой матрице карбида кремния создается вторичный карбид кремния путем пропитки углеродсодержащим мономером и последующим силицированием образца в газовой фазе в присутствии нитрида кремния при температурах до 1500–1850 °С. В качестве пропитки используют фенолформальдегидную смолу, имеющую максимальный выход по углероду при термической деструкции, или роливсан МВ-1, имеющий меньший выход, но обладающий низкой вязкостью, хорошей смачиваемостью и способностью пропитывать керамику с минимальной пористостью. Далее, после

нескольких циклов модификации и защиты от окисления, плотность керамики увеличилась с 2,3 до 2,7 г/см³, прочность при изгибе – с 64 до 348 МПа, изменение массы исходного образца при окислении при температуре 1300 °С на воздухе в течение 50 ч составило от 6 до 0,55 % у модифицированного образца [18].

Интересным оказался эффект пропитки предварительно спеченного образца карбида кремния акрилонитрилом, его полимеризации и термообработки, в процессе которых в порах керамики образовывались частицы полиакрилонитрила, переходящие в молекулы углерода удлиненной формы, как это происходит в случае получения полиакрилонитрильного углеродного волокна. При обработке модифицированных полиакрилонитрилом образцов в присутствии порошка нитрида кремния происходит образование усов карбида кремния как в объеме образца, так и верхней части тигля над засыпкой. Оптимизация этого процесса позволила бы получить образцы карбида кремния с более высокими механическими характеристиками.

Во втором случае в качестве исходного углеродсодержащего материала взят углепластик из полиакрилонитрильного углеродного волокна на эпоксидном связующем, в котором в результате деструкции образовался дисперсный углерод. Силицирование через газовую фазу в присутствии порошка нитрида кремния приводило к образованию матрицы карбида кремния, армированной углеродным волокном. Защита от окисления осуществлялась так же, как и в предыдущих случаях. Прочность образца при изгибе составляла 150–200 МПа, а значение K_{Ic} достигло 10 МПа√м, что в ~2 раза превышало значение трещиностойкости плотной керамики на основе Si₃N₄.

Образец материала SiC–C_f, защищенный от окисления, прошел без изменений испытания на воздухе при температуре 1300 °С.

Недостаточная прочность композиционного материала при изгибе, очевидно, обусловлена тем, что даже при «мягком» силицировании нарушалась поверхностная целостность углеродного волокна. В этом случае при разработке новых композиционных материалов системы SiC–C_f целесообразно применять углеродные волокна, предварительно защищенные известными способами с применением карбида кремния [19]. Такой композиционный материал на основе углеродных волокон с керамической матрицей мог бы решить проблему хрупкости высокотемпературных керамических материалов при эксплуатации в силовых установках при температурах 1400–1500 °С.

Заключения

Благодаря сочетанию нескольких технологических подходов разработан высокотермостойкий малоусадочный материал на основе карбида кремния, из которого можно изготавливать детали сложной формы без механической обработки или с небольшой доработкой любым инструментом после первоначального спекания, работоспособные при температурах до 1400–1600 °С в окислительной среде и в продуктах сгорания топлива. Материал может быть применен в горячей зоне газотурбинного двигателя в качестве различных форсунок, горелок и других изделий в течение длительного времени или кратковременно при более высоких температурах.

Разработанная технология может успешно применяться при разработке композиционных материалов с керамической матрицей из карбида кремния, армированных углеродными волокнами.

Список источников

1. Способ получения изделий на основе нитрида кремния: пат. 2239613 Рос. Федерация; заявл. 02.10.03; опубл. 11.10.04.
2. Vikulin V. Production of Si₃N₄-Based Articles and Their Application in Aerospace Industry // Advances in Science and Technology. 2006. Vol. 45. P. 1751–1758.

3. Бхатнагара А. Мир материалов. Легкие баллистические материалы. М.: Техносфера, 2000. 392 с.
4. Molded porous ceramic article containing SiC and proses for the production there of: pat. 7648932B2 US; appl. 07.05.06; publ. 19.01.10.
5. Method for producing an abrasive compact: pat. 2176191 B1 EP; appl. 23.07.08; publ. 21.04.10.
6. Каблов Е.Н. Инновационные работы 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: 1018577/ 2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Керамический окислительно стойкий композиционный материал и изделия из него: пат. 2560046 C1 Рос. Федерация; заявл. 10.07.14; опубл. 20.08.15.
8. Керамический композиционный материал и изделия, выполненные из него: пат. 2700428 C1 Рос. Федерация; заявл. 17.09.17; опубл. 18.07.18.
9. Термостойкий малоусадочный материал на основе карбида кремния: а.с. 197832 СССР; заявл. 19.08.81; опубл. 17.09.82.
10. Vikulin V., Leshuk T. Material based chemically strengthened silicon carbide // Refractories and Industrial Ceramics. 1992. Vol. 32. No. 9-10. P. 510–515.
11. Викулин В., Лешук Т. Материалы на основе химически упрочненного карбида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 1991. № 10. С. 8–12.
12. Способ обработки изделий из керамических материалов на основе карбида кремния и/или углерода: пат. 2276661 Рос. Федерация; заявл. 28.07.04; опубл. 20.05.06.
13. Vikulin V., Romashin A., Leshuk T. Si₃N₄–Si composite ceramics and chemically toughened SiC for engine components. Ceramics in Energy Applications // 2nd International conference proceedings. London, 1994. P. 21–32.
14. Викулин В., Костина Л., Лешук Т., Штарев Г. Изделия из малоусадочного карбида кремния // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов. М.: ВИМИ, 1988. С. 33–34.
15. Суворов С., Чайкун Е., Гусаров В. Многослойные материалы на основе карбида кремния, стойкие к окислению // Оборудование, материалы, процессы. М.: ВИМИ, 1989. Вып. 3. С. 29–30.
16. Protective siliconoxinitride coating for porous refractories: pat. 4187344A US; appl. 27.09.78; publ. 05.02.80.
17. Способ защиты поверхности карбида кремния при высокотемпературном травлении: а.с. 270080 СССР; заявл. 05.03.74; опубл. 12.05.75.
18. Материалы на основе малоусадочного карбида кремния: а.с. 235082 СССР; заявл. 27.02.84; опубл. 24.03.85.
19. Doorbar Ph.J., Kyle-Henney S. Development of Continuosly-Rreinforced Metal Matrix Composite for Aerospace Applications // Comprehensive Composite Materials II. 2018. Vol. 4. P. 439–463. DOI: 10.1016/B 978-0-12-803581-8.09983-5.

References

1. Method for producing products based on silicon nitride: pat. 2239613. Rus. Federation; appl. 02.10.03; publ. 11.10.04.
2. Vikulin V. Production of Si₃N₄-Based Articles and Their Application in Aerospace Industry. *Advances in Science and Technology*, 2006, vol. 45, pp. 1751–1758.
3. Bhatnagar A. *World of Materials. Lightweight Ballistic Materials*. Moscow: Tekhnosfera, 2000, 392 p.
4. Molded porous ceramic article containing SiC and proses for the production there of: pat. 7648932B2 US; appl. 07.05.06; publ. 19.01.10.
5. Method for producing an abrasive compact: pat. 2176191 B1 EP; appl. 23.07.08; publ. 21.04.10.
6. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 1018577/ 2071-9140-2015-0-1-3-33.

7. *Ceramic oxidation-resistant composite material and products made from it*: pat. 2560046 C1 Rus. Federation; appl. 10.07.14; publ. 20.08.15.
8. *Ceramic composite material and products made from it*: pat. 2700428 C1 Rus. Federation; appl. 17.09.17; publ. 18.07.18.
9. *Heat-resistant low-shrinkage material based on silicon carbide*: a.s. 197832 USSR; appl. 19.08.81; publ. 17.09.82.
10. Vikulin V., Leshuk T. Material based chemically strengthened silicon carbide. *Refractories and Industrial Ceramics*, 1992, vol. 32, no. 9–10, pp. 510–515.
11. Vikulin V., Leshchuk T. Materials based on chemically strengthened silicon carbide. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 1991, no. 10, pp. 8–12.
12. *Method for processing products from ceramic materials based on silicon carbide and/or carbon*: pat. 2276661 Rus. Federation; appl. 28.07.04; publ. 20.05.06.
13. Vikulin V., Romashin A., Leshuk T. Si₃N₄–Si composite ceramics and chemically toughened SiC for engine components. *Ceramics in Energy Applications. 2nd International conference proceedings*. London, 1994, pp. 21–32.
14. Vikulin V., Kostina L., Leshchuk T., Shtarev G. Low-shrinkage silicon carbide products. *Designs and technologies for producing products from non-metallic materials*. Moscow: VIMI, 1988, pp. 33–34.
15. Suvorov S., Chaykun E., Gusarov V. Multilayer oxidation-resistant materials based on silicon carbide. *Oborudovanie, materialy, protsessy*. Moscow: VIMI, 1989, is. 3, pp. 29–30.
16. *Protective siliconoxinitride coating for porous refractories*: pat. 4187344A US; appl. 27.09.78; publ. 05.02.80.
17. *Method for protecting the surface of silicon carbide during high-temperature etching*: a. s. 270080 USSR; appl. 05.03.74; publ. 12.05.75.
18. *Materials based on low-shrinkage silicon carbide*: a. s. 235082 USSR; appl. 27.02.84; publ. 24.03.85.
19. Doorbar Ph.J., Kyle-Henney S. Development of Continuously-Reinforced Metal Matrix Composite for Aerospace Applications. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, vol. 4, pp. 439–463. DOI: 10.1016/B 978-0-12-803581-8.09983-5.

Информация об авторах

Викулин Владимир Васильевич, помощник генерального директора по науке, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Гвоздев Святослав Сергеевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir V. Vikulin, Assistant Director General for Science, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Svyatoslav S. Gvozdev, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; получена после доработки 30.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.05.2025.
The article was submitted 18.04.2025; received in revised form 30.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 30.05.2025.

Научная статья

УДК 669.859:537.622

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73

МАГНИТЫ С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ НАВИГАЦИИ

М.В. Потапов¹, А.В. Бузенков¹, Р.Б. Моргунов^{1,2}, В.П. Пискорский¹

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 Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия; office@icp.ac.ru

Аннотация. Исследованы материалы систем Fe–Ni–Al–Co и Pr–Nd–Dy–Fe–Co–B. Проведены спекание и последующая термическая обработка в виде высокотемпературного отжига, охлаждения в магнитном поле и ступенчатого отжига. Исследовано влияние термической обработки на магнитные свойства образцов. Определена величина температурного коэффициента индукции. Показано, что данные спеченные материалы по этой величине аналогичны магнитам ЮНДК. Выявлено отрицательное влияние примеси неодима на термостабильность материала. Для повышения температурной стабильности необходимо повысить содержание кобальта.

Ключевые слова: постоянные магниты, редкоземельные магниты, намагниченность насыщения, остаточная индукция, коэрцитивная сила, коэффициент прямоугольности кривой размагничивания, температурный коэффициент индукции, температурный коэффициент коэрцитивной силы

Для цитирования: Потапов М.В., Бузенков А.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Магниты с высокой температурной стабильностью для навигации // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73.

Scientific article

MAGNETS WITH HIGH TEMPERATURE STABILITY FOR NAVIGATION

M.V. Potapov¹, A.V. Buzenkov¹, R.B. Morgunov^{1,2}, V.P. Piskorsky¹

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

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Moscow region, Russia; office@icp.ac.ru

Abstract. Materials of Fe–Ni–Al–Co and Pr–Nd–Dy–Fe–Co–B systems were studied in the article. Sintering and further heat treatment in the form of high temperature annealing, cooling in a magnetic field, and a stepwise annealing were performed. The effect of heat treatment on the magnetic properties of the samples, as well as the temperature coefficient of induction were investigated. It is shown that these sintered materials are similar in magnitude to AlNiCo magnets. The negative effect of neodymium impurity on the thermal stability of the material has been revealed. In order to improve temperature stability, it is necessary to increase the cobalt content.

Keywords: permanent magnets, rare-earth magnets, saturation magnetization, residual induction, coercive force, squareness factor of demagnetization curves, temperature induction coefficient, temperature coefficient coercive force

For citation: Potapov M.V., Buzenkov A.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. Magnets with high temperature stability for navigation. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-63-73.

Введение

Магниты из сплавов системы ЮНДК заслуживают внимания ввиду их обширного использования в самых различных областях промышленности, например в авиационном двигателестроении. Это обусловлено высокой рабочей температурой, которая в условиях эксплуатации может достигать $\sim 600^\circ\text{C}$ [1]. В общем случае монокристаллические магниты марки ЮНДК25БА обладают следующими характеристиками: остаточная индукция (B_r) 1,2–1,3 Тл, коэрцитивная сила по индукции (H_{CB}) 56–68 кА/м, максимальная рабочая температура $\sim 550^\circ\text{C}$ [2].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ получен магнит состава (% (по массе)) $\text{Al}_{7,76}\text{Ni}_{13,35}\text{Co}_{24,30}\text{Cu}_{3,12}\text{Nb}_{0,52}\text{S}_{0,30}\text{Fe}_{\text{ост}}$ со следующими свойствами: $B_r = 1,36$ Тл, коэрцитивная сила по намагниченности (H_{CI}) 57,1 кА/м [1]. В работе [3] описано применение аддитивных технологий для получения магнита состава (% (по массе)) $\text{Al}_{7,6}\text{Ni}_{12,7}\text{Co}_{22,8}\text{Cu}_{2,7}\text{Nb}_{0,52}\text{S}_{0,30}\text{Fe}_{53,1}$ со следующими свойствами: $B_r = 1,54$ Тл, $H_{CI} = 17,6$ кА/м, $H_{CB} = 17,5$ кА/м. В работе [4] изучены свойства магнита состава (% (по массе)) $\text{Al}_{8,2}\text{Ni}_{14,0}\text{Co}_{24,3}\text{Cu}_{2,3}\text{Nb}_{1,0}\text{Fe}_{49,9}$ и получены следующие значения: $B_r = 1,35$ Тл, $H_{CI} = 59,2$ кА/м. В этой работе также приведен состав основной (α_1) и изолирующей (α_2) магнитных фаз в % (атомн.). Фаза α_1 имеет состав $\text{Fe}_{66,76}\text{Co}_{24,62}\text{Ni}_{3,1}\text{Al}_{4,87}\text{Cu}_{0,3}$, фаза α_2 – $\text{Fe}_{13,9}\text{Co}_{16,42}\text{Ni}_{30,47}\text{Al}_{34,5}\text{Cu}_{4,34}$.

В работе [5] приведены данные по величине температурного коэффициента индукции (ТКИ) материала состава $\text{Fe}_{32,2}\text{Co}_{36}\text{Ni}_{13,5}\text{Al}_{7,6}\text{Ti}_{6,2}\text{Cu}_{3,8}\text{Zr}_{0,5}\text{B}_{0,2}$. Получены значения ТКИ, %/К: $-0,0386$ – в диапазоне 300–400 К, $-0,0348$ – в диапазоне 300–600 К, $-0,0331$ – в диапазоне 300–800 К. В статье [6] использовали материал состава (% (по массе)) $\text{Al}_{6,8}\text{Ni}_{13,9}\text{Co}_{34,9}\text{Cu}_{3,3}\text{Nb}_{0,7}\text{S}_{0,4}\text{Si}_{0,2}\text{Fe}_{34,1}$, имеющий следующие свойства: $B_r = 1,08$ Тл, $H_{CI} = 126$ кА/м. В работе [7] исследовали материал состава $\text{Al}_{6,76}\text{Ni}_{12,12}\text{Co}_{35,35}\text{Cu}_{3,03}\text{Nb}_{0,90}\text{Fe}_{33,28}\text{Ti}_{6,56}\text{Nd}_{2,0}$, определены ТКИ и температурный коэффициент коэрцитивной силы (β) в различных температурных диапазонах (табл. 1).

Таблица 1

Температурный коэффициент индукции (ТКИ) и температурный коэффициент коэрцитивной силы (β) материала состава $\text{Al}_{6,76}\text{Ni}_{12,12}\text{Co}_{35,35}\text{Cu}_{3,03}\text{Nb}_{0,90}\text{Fe}_{33,28}\text{Ti}_{6,56}\text{Nd}_{2,0}$ в различных диапазонах температур [7]

Показатель	Значение показателя, %/К, в диапазоне температур, К						
	10–300	100–300	200–300	300–400	300–500	300–700	300–800
ТКИ	0,0437	0,0350	0,0686	–0,0238	–0,0373	–0,0298	–0,0355
β	0,0160	0,0006	0,0110	–0,0004	–0,0631	0,0392	–0,0495

Величины ТКИ и β вычисляли по формулам

$$\text{ТКИ} = \frac{B_r(T_1) - B_r(T_0)}{B_r(T_0)(T_1 - T_0)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{H_{CI}(T_1) - H_{CI}(T_0)}{H_{CI}(T_0)(T_1 - T_0)} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где T_0 и T_1 – начальная и конечная температуры измерения.

Однако, несмотря на хорошую температурную стабильность, сплавы ЮНДК уступают материалам системы РЗМ–Fe–Co–В по значениям коэрцитивной силы и максимального энергетического произведения, поэтому их использование в ряде устройств, таких как динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), ограничено.

В индикаторных гиросtabilизаторах и бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) преимущественно применяют ДНГ [8]. Это один из наиболее энергетически эффективных чувствительных элементов, имеющий оптимальное соотношение критериев стоимости и точности, а также приемлемую массогабаритную характеристику. В последнее время для создания малогабаритных БИНС используют ДНГ массой до 0,1 кг. В соответствии с требованиями БИНС, эти приборы должны иметь измерительный диапазон до 200 градусов/с и случайный уход оси $\sim(0,01-0,1)$ угловых градусов/ч.

В процессе эксплуатации искусственных спутников Земли постоянно возникает потребность в изменении и расширении круга задач и требований к применяемым в них узлам, агрегатам и их техническим характеристикам, в частности к точности положения, за которую отвечает система навигации. В качестве примера можно привести летательные аппараты, преимущественно базирующиеся на космической орбите, которые оборудованы оптическими приборами (например, камеры высокого разрешения и телескопы), а также аппараты, отвечающие за создание и поддержание систем навигации спутников. К точности позиционирования аппаратов этого класса предъявляют особые требования, которые выполняются при использовании ДНГ [9]. Конструкцию ДНГ постоянно модернизировали и улучшали, на данный момент можно утверждать, что достигнута предельная эффективность их работы.

Для ДНГ требуются кольцевые магниты с радиальной текстурой [10], производство которых является нетривиальной и наукоемкой задачей. Возникает необходимость поиска материалов с максимально высокой коэрцитивной силой. Высококоэрцитивные материалы системы Sm–Co для этих целей не подходят, так как разрушаются при изготовлении от внутренних растягивающих напряжений, превышающих предел прочности при растяжении [11, 12].

Такие магниты можно изготовить только из редкоземельных материалов на основе неодима или празеодима, поскольку в этом случае возникают сжимающие напряжения, не превышающие прочность материала при сжатии [10]. Для защиты от коррозионного поражения в условиях эксплуатации на магниты этой системы наносят покрытия типа Ni–Ni или Ni–Cu–Ni, в ряде случаев с дополнительным внешним слоем эпоксидной смолы или других полимерных материалов [13, 14]. Для повышения температурной стабильности эти материалы также легируют диспрозием и кобальтом [15, 16]. Экспериментальным путем выявлено, что в этом случае абсолютная величина ТКИ уменьшается [16]. Следует отметить, что при исследовании величины ТКИ возможно проводить не только статические магнитные измерения, но и применять эффект Мессбауэра (ядерный гамма-резонанс). Причем величины ТКИ, полученные с использованием этих подходов, совпадают. В работе [17] показано, что для материала состава $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)_{14}\text{B}$ величина ТКИ в диапазоне температур 250–350 К составила $-0,05 \text{ \%}/\text{K}$ при измерении обоими способами. Более того, из данных эффекта Мессбауэра можно найти величину ТКИ на шести кристаллографически неэквивалентных узлах, т. е. измерить не совокупный ТКИ образца, а температурный коэффициент намагниченности на отдельных атомах в зависимости от их положения в кристаллической решетке основной магнитной фазы, что невозможно получить методом статических магнитных измерений.

В работе [18] исследованы материалы состава $\text{Fe}_{60}\text{Cr}_{27}\text{Co}_{10}\text{Mo}_2\text{Ti}_1$ (%) (по массе). По формулам (1) и (2) получены значения ТКИ ($-0,0128 \text{ \%}/\text{K}$) и β ($-0,0104 \text{ \%}/\text{K}$) в области температур от 23 до 500 °С при величине $B_r = 1,0-1,18 \text{ Тл}$ и $H_{cl} = 36-48 \text{ кА/м}$.

В работе [19] методом селективного лазерного спекания получены образцы из сплава 25X15KA, которые обладали следующими свойствами: $H_{св} = 44,8\text{--}46,1$ кА/м, $B_r = 0,94\text{--}1,02$ Тл, $\rho = 7,55\text{--}7,59$ г/см³. Данные по величине ТКИ в этой работе не приведены. В работе [20] для сплава 22X15K4МС в диапазоне температур от 20 до 150 °С получены значения ТКИ = $-0,147$ %/К и $\beta = 0,169$ %/К. Наиболее высокие характеристики получены для монокристаллических материалов типа ЮНДК. Монокристаллические магниты систем Alnico и Fe–Co–Cr–Mo, которые изготавливают на одном из предприятий в США, обладают характеристиками, представленными в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики монокристаллических магнитов систем Alnico и Fe–Co–Cr–Mo

Показатель	Значение показателя для магнита системы	
	Alnico-8AA	Fe–Co–Cr–Mo
Остаточная индукция, Тл	1,15	1,4–1,5
Коэрцитивная сила по индукции, кА/м	115–120	65–70
Максимальное энергетическое произведение, кДж/м ³	80–90	72–80
Температурный коэффициент индукции в диапазоне от –60 до +250 °С, %/К	0,0005	0,0005

В работе [21] описаны материалы системы $R(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{6,09}$, где R – редкоземельные металлы (РЗМ). В диапазоне температур от 22 до 150 °С получен диапазон величин ТКИ от $-0,0063$ до $-0,0019$ %/К при $B_r = 0,907$ Тл и поле «колена» $H_k = 1712$ кА/м (наблюдается заметное увеличение коэрцитивной силы). Более подробно изготовление магнита аналогичного состава рассмотрено в источнике [22]. В работах [23–25] показано, что увеличение содержания кобальта в магнитах системы Nd–(Pr)–Dy–Fe–Co–B, аналогично влиянию диспрозия, вызывает уменьшение абсолютной величины ТКИ.

Важность исследования материалов данного класса обусловлена необходимостью как создания конкуренции на мировом рынке магнитотвердых материалов и замещения импорта зарубежных аналогов, так и обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации [26].

Материалы и методы

Выплавку РЗМ осуществляли методом индукционного плавления в набивном керамическом тигле с использованием следующих шихтовых материалов: празеодим ПрМ-1, диспрозий ДиМ-1, кобальт К0, железо АРМКО. Бор вводили в плавку в виде лигатуры марки ФБ-20 состава $\text{Fe}_{88,7}\text{B}_{11,3}$ (%) (по массе)). Процесс изготовления магнитов состоял из следующих операций: дробление слитка выбранного состава для получения фракции частиц размером менее 630 мкм в защитной среде азота (ГОСТ 9293–74); дополнительное измельчение с использованием планетарно-центробежной мельницы в среде хладона 113; прессование в магнитном поле напряженностью ~ 800 кА/м для формирования текстуры, ориентированной вдоль магнитного поля; спекание в печи типа СНВЭ в вакууме (10^{-5} мм рт. ст.) при температурах 1100–1130 °С.

Методом атомно-эмиссионного анализа с использованием спектрометра определен химический состав сплава. Для измерения содержания таких элементов, как азот, кислород и углерод, применяли газоанализатор, примесей – масс-спектрометр. Особенности микроструктуры регистрировали с помощью традиционных методов оптической микроскопии, фазовый состав – методом рентгеновского фазового анализа и микро-рентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе. Температурный интервал кристаллизации исследовали с использованием дифференциального сканирующего калориметра. Измерение магнитных свойств проводили прямым

методом определения гистерезиса намагниченности. Наличие микроструктуры, вызывающей высококоэрцитивное состояние, исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии.

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

Результаты и обсуждение

Кривые размагничивания по намагниченности и по индукции некоторых образцов представлены на рис. 1.

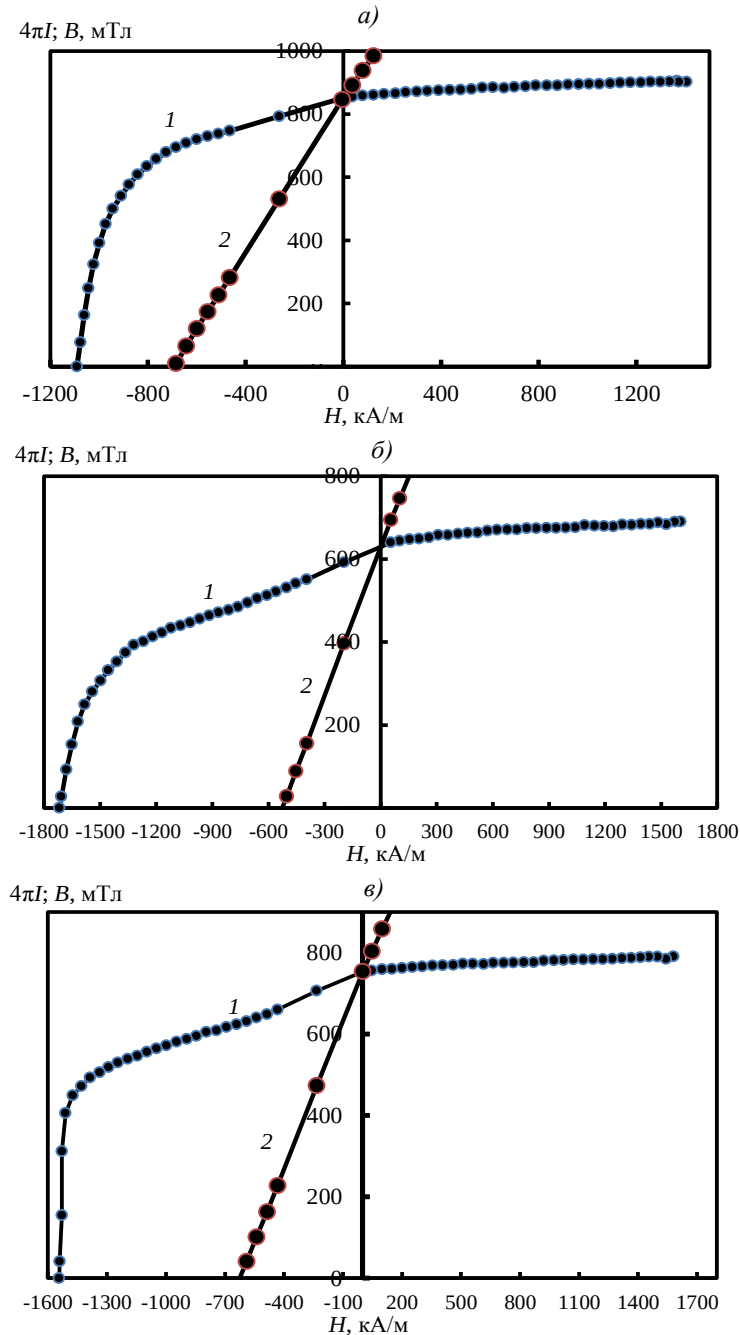


Рис. 1. Кривые размагничивания по намагниченности $4\pi I$ (1) и по индукции B (2) спеченных материалов составов $(\text{Nd}_{0,20}\text{Pr}_{0,30}\text{Dy}_{0,50})_{17,78}(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{76,91}\text{B}_{5,31}$ (а), $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,2}(\text{Fe}_{0,76}\text{Co}_{0,24})_{76,30}\text{B}_{10,5}$ (б) и $(\text{Pr}_{0,53}\text{Dy}_{0,47})_{13,37}(\text{Fe}_{0,80}\text{Co}_{0,20})_{78,64}\text{B}_{7,99}$ (в), измеренные при температуре $24 \pm 5^\circ \text{C}$

Свойства образцов системы РЗМ–Fe–Co–В представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства спеченных материалов при температуре 24 ± 5 °С

Состав материала в атомных долях	$T_{\text{сп}},$ °С	$\rho,$ кг/м ³	$H_{\text{сд}},$ кА/м	$H_{\text{св}},$ кА/м	$4\pi I_{\text{с}},$ мТл	$B_r,$ мТл	$H_k,$ кА/м	SF
(Nd _{0,20} Pr _{0,30} Dy _{0,50}) _{17,78} (Fe _{0,70} Co _{0,30}) _{76,91} B _{5,31}	1130	7980	1090	700	905	850	300	0,28
(Nd _{0,11} Pr _{0,39} Dy _{0,50}) _{17,27} (Fe _{0,71} Co _{0,29}) _{77,57} B _{5,16}	1130	7940	1550	640	800	750	400	0,26
(Nd _{0,59} Dy _{0,41}) _{16,48} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{75,95} B _{6,57}	1130	7760	1700	470	625	570	300	0,18
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,26} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{77,0} B _{9,74}	1100	7670	1680	580	720	670	400	0,24
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,2} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{76,30} B _{10,5}	1100	7680	1720	510	690	625	200	0,12
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,37} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,64} B _{7,99}	1140	7680	1540	640	790	750	390	0,25
(Pr _{0,65} Dy _{0,35}) _{13,08} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,95} B _{7,97}	1130	7680	1114	606	820	770	390	0,35
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	1130	7790	1560	640	760	725	300	0,19

Примечание. $T_{\text{сп}}$ – температура спекания; ρ – плотность материала; $H_{\text{сд}}, H_{\text{св}}$ – коэрцитивная сила по намагниченности и по индукции; $4\pi I_{\text{с}}$ – намагниченность насыщения; B_r – остаточная индукция; H_k – поле «колена»; SF – коэффициент прямоугольности кривой размагничивания.

На рис. 2 представлена зависимость намагниченности насыщения ($4\pi I_{\text{с}}$) сплава X30K15M2T, имеющего состав (% (по массе)) Cr₃₀Co₁₅Mo₂Ti₁, от температуры отжига.

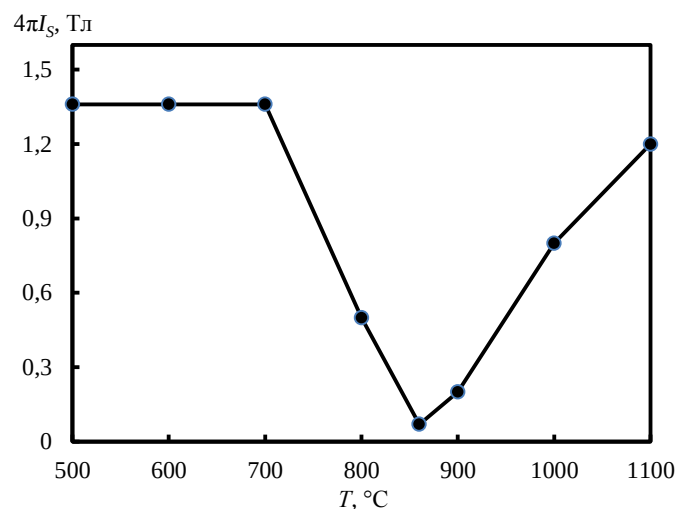


Рис. 2. Зависимость величины намагниченности насыщения $4\pi I_{\text{с}}$ магнитотвердого материала марки X30K15M2T, имеющего состав Cr₃₀Co₁₅Mo₂Ti₁, от температуры отжига T

Максимум экзотермического процесса проявляется при температуре 795 °С. Используя полученные ранее данные температурных зависимостей намагниченности насыщения, можно сделать предположение о протекании фазовых превращений в температурном интервале 500–1100 °С: при 595 °С происходит распад α -твердого раствора на α_1 - и α_2 -фазы; при 795 °С выделяется наибольшее количество σ -фазы; при 970 °С наблюдается выделение γ -фазы из α -твердого раствора. В диапазоне температур от 20 до 130 °С величина ТКИ материала марки X30K15M2T равна $-0,021$ %/К.

В зависимости от состава и технологии изготовления величина ТКИ таких материалов в области температур от 20 до 130 °С находится в указанных ранее пределах.

Однако это не относится к монокристаллическим магнитам из этого материала, для которых абсолютная величина ТКИ уменьшается по крайней мере на два порядка.

В табл. 4 приведены значения ТКИ в различных температурных диапазонах для спеченных материалов системы Nd–(Pr)–Dy–Fe–Co–B.

Таблица 4

Температурный коэффициент индукции некоторых спеченных материалов

Состав материала в атомных долях	Температурный коэффициент индукции, %/К, в диапазоне температур, К		
	300–400	300–500	300–550
(Nd _{0,59} Dy _{0,41}) _{16,48} (Fe _{0,79} Co _{0,21}) _{75,95} B _{6,57}	–0,0380	–0,0576	–0,0692
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,26} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{77,0} B _{9,74}	–0,0300	–0,0505	–0,06266
(Pr _{0,53} Dy _{0,47}) _{13,37} (Fe _{0,80} Co _{0,20}) _{78,64} B _{7,99}	–0,0366	–0,0594	–0,0730
(Pr _{0,55} Dy _{0,45}) _{13,12} (Fe _{0,76} Co _{0,24}) _{78,98} B _{7,9}	–0,0316	–0,0522	–0,0641

В соответствии с данными, представленными в табл. 3 (строки 1 и 2), можно сделать вывод, что с уменьшением содержания неодима коэрцитивная сила по намагниченности значительно возрастает, а величина остаточной индукции уменьшается. При этом содержание диспрозия и кобальта остается неизменным при одинаковой температуре спекания. По данным работы [27], неодим и празеодим в данном случае имеют практически одинаковый магнитный момент. Однако диффузионные процессы в материалах на основе неодима протекают быстрее, чем в сплавах на основе празеодима [28], что, по-видимому, связано со скоростью диффузии этих ионов. Данный эффект, влияющий на магнитные свойства, требует дальнейших исследований. В материале без празеодима (строка 3 в табл. 3) величина H_{CI} возросла, а величины H_{CB} , $4\pi I_S$ и H_K , наоборот, уменьшились. Таким образом, можно сделать вывод, что неодим является вредной примесью для термически стабильных магнитов.

Аналогичное заключение можно сделать также исходя из данных, приведенных в табл. 4 (строка 1). По крайней мере в диапазоне температур 300–400 К абсолютная величина ТКИ материалов, не содержащих неодим, меньше, несмотря на большее содержание кобальта. При других температурах наблюдается схожая закономерность.

Анализ данных табл. 1 и 4 позволяет сделать вывод, что термостабильный материал на основе празеодима превосходит по магнитным характеристикам классический материал ЮНДК. Если повысить содержание кобальта, то по величине ТКИ этот материал превзойдет поликристаллический материал ЮНДК [29].

В настоящее время полагают, что величина ТКИ материала неинформативна. Величиной ТКИ можно характеризовать только материалы с максимально высокой температурой Кюри, такие как системы ЮНДК и Fe–Cr–Co. В этом случае рабочий диапазон температур находится в области линейного изменения намагниченности.

Таким образом, магнитный материал для навигационных приборов, имеющий большую величину коэрцитивной силы, необходимо характеризовать формой температурной зависимости намагниченности. В идеале эта зависимость должна быть параллельна оси температур [30]. Требуется проведение дальнейших исследований магнитных характеристик, таких как ТКИ и коэрцитивная сила, для различных составов с варьируемой термической обработкой для наиболее полного понимания влияния различных РЗМ на термостабильность магнитов для навигации.

Заключения

Разработаны магнитотвердые материалы, превосходящие по коэрцитивной силе по намагниченности (и по индукции) классические термостабильные магниты марки ЮНДК более чем на порядок: значения H_{CI} для составов $(Pr_{0,53}Dy_{0,47})_{13,2}(Fe_{0,76}Co_{0,24})_{76,30}B_{10,5}$ и $Al_{6,8}Ni_{13,9}Co_{34,9}Cu_{3,3}Nb_{0,7}S_{0,4}Si_{0,2}Fe_{34,1}$ составили 1720 и 126 кА/м соответственно. Исследованные материалы уступают магнитам марки ЮНДК по величине ТКИ ($-0,03$ %/К против $-0,024$ %/К в диапазоне температур 300–400 К). Если увеличить содержание кобальта до 0,30–0,35 атомных долей (вместо 0,24 атомных долей в исследованных материалах), то по величине ТКИ эти материалы превзойдут магниты ЮНДК, уступая только их монокристаллической модификации. Однако следует учитывать сложность изготовления монокристаллических магнитов. При этом даже монокристаллические магниты ЮНДК будут значительно уступать материалам, исследованным в данной работе, по величине коэрцитивной силы. В магнитах ЮНДК этот показатель не может быть увеличен принципиально, поскольку определяется только анизотропией формы зерен (такова характеристика формирования этой величины в магнитах марки ЮНДК).

Список источников

1. Матусевич В.А., Гетья А.Н., Шарабан Ю.В. Применение высококоэрцитивных постоянных магнитов в самолетных агрегатах // Электротехника и электромеханика. 2006. № 1. С. 33–35.
2. Чередниченко И.В., Бавина М.А., Бондаренко Ю.А., Шурыгин В.Д., Овчинников А.Д., Галимуллин С.А. Влияние параметров направленной кристаллизации на структуру и свойства постоянных магнитов из сплава ЮНДКБА // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
3. Жуков А.С., Жумагалиева А.А., Хроменков М.В. и др. Структура и свойства магнитных материалов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17. № 2. С. 251–256. DOI: 10.25712/ASTU.111-1416.2020.02.0116.
4. Liu Z., Miller M.K., Ping L. et al. Architecture and magnetism of alnico // Acta Materialia. 2014. Vol. 74. P. 224–233.
5. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 466. P. 2777–2782. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.020.
6. Bin S., Bingbing L., Chunhong L. et al. Microstructure and distribution of low content elements in AlNiCo 9 // Materials Science Forum. 2017. Vol. 898. P. 1669–1674.
7. Sajjad U.R., Qingzheng J., Qiulan T. et al. Evolution of microstructure, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons // IEEE Transactions on Magnetics. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 127–132.
8. Василевский Н.И. Разработка динамически настраиваемого гироскопа с учетом его вибрационных характеристик. Миасс: Южно-Уральский государственный университет, 2018. 77 с.
9. Чиркин Д.С., Рословец П.В., Татаринов Ф.В. и др. Уменьшение дрейфа динамически настраиваемого гироскопа от запуска к запуску // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 1. С. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Резчикова И.И., Бузенков А.В. Кольцевые магниты с радиальной текстурой для динамически настраиваемых гироскопов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-89-94.
11. Jianjun T., Huanhui Q., Shengen Z. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented $Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z$ ring magnets // Materials Letters. 2007. Vol. 61. P. 5271–5274.

12. Anhua L., Wei L., Huijie W. et al. The study on thermal expansion of sintered $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnets // IEEE Transaction on Magnetics. 2009. Vol. 45. No. 10. P. 4402–4404.
13. Горлов Д.С., Чередниченко И.В., Валеев Р.А., Чесноков Д.В. Повышение коррозионной стойкости магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-97-107.
14. Демин С.А., Заварзин С.В., Чередниченко И.В., Козлов И.А. Защитное противокоррозионное покрытие магнитов системы РЗМ–Fe–B // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.
15. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the $\text{R}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ ferromagnetic Systems ($\text{R}=\text{Dy}$ and Er) // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 66. P. 63–68.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Резчикова И.И., Валеев Р.А., Чередниченко И.В., Моргунов Р.Б. Сравнение температурной стабильности магнитов на основе SmCo и PrDy-FeCo-B // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 42–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-42-46.
17. Meeran R., Kamal R. A Mossbauer spectroscopic study of $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{B}$ at $x = 0,13$ between 100 K and 700 K // Journal of the Less-Common Metals. 1987. Vol. 128. P. 343–350.
18. Zubair A., Shan T., Mozaffar H. Tailoring magnetic properties in 60Fe-27Co-2Mo-1Ti magnetic alloy by Ni and Hf additive // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2021. Vol. 538. P. 169257. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168266.
19. Ефремов Д.Б., Герасимова А.А. Получение магнитов из материала системы Fe–Cr–Co методом селективного лазерного спекания // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 721–727. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-721-727.
20. Генералова К.Н. Закономерности фазовых превращений и свойства порошковых магнитных материалов на основе системы Fe–Cr–Co–Si и нестехиометрического сплава Cu–Au: дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. 138 с.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F. et al. High $(\text{BH})_{\text{max}}$ permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of B_R // Proceedings of 20th International Workshop on rare earth permanent magnets and their applications. Grete, 2008. P. 1–6.
22. Ray A.E. Metallurgical behavior of $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ alloys // Journal of Applied Physics. 1984. Vol. 55. P. 2094–2096.
23. Masato S., Setsuo F., Hitoshi Y. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds // IEEE Transactions on Magnetics. 1984. Vol. 20. P. 1584–1589.
24. Jiang S.Y., Chen H.Y., Cheng S.F. et al. Magnetic properties of R-Fe-B and R-Fe-Co-Al-B magnets ($\text{R}=\text{Pr}$ and Nd) // Journal of Applied Physics. 1988. Vol. 64. P. 5510–5512.
25. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г. и др. Расчет температурного коэффициента индукции наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr-Dy-Fe-Co-B методом молекулярного поля // Металлы. 2010. № 1. С. 64–67.
26. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
27. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological aspects // Reviews of Modern Physics. 1991. Vol. 63. No. 4. P. 819–898.
28. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials // Journal of Alloys and Compounds. 2000. Vol. 296. P. 223–228.
29. Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Влияние высоких концентраций кобальта на свойства магнитов Pr-Dy-Fe-Co-B и Nd-Dy-Fe-Co-B // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
30. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.

References

1. Matusevich V.A., Getya A.N., Sharaban Yu.V. Application of high-coercivity permanent magnets in aircraft units. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2006, no. 1, pp. 33–35.
2. Cherednichenko I.V., Bavina M.A., Bondarenko Yu.A., Shurygin V.D., Ovchinnikov A.D., Galimullin S.A. Influence of directed crystallization parameters on structure and properties of Alnico 5-7 alloy permanent magnets. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-77-89.
3. Zhukov A.S., Zhumagalieva A.A., Khromenkov M.V. et al. Structure and properties of magnetic materials manufactured by selective laser melting. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 251–256. DOI: 10.25712/ASTU.111-1416.2020.02.0116.
4. Liu Z., Miller M.K., Ping L. et al. Architecture and magnetism of alnico. *Acta Materialia*, 2014, vol. 74, pp. 224–233.
5. Rehman S.U., Jiang Q., He L. et al. Synthesis, microstructures, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 466, p. 2777–2782. DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.07.020.
6. Bin S., Bingbing L., Chunhong L. et al. Microstructure and distribution of low content elements in AlNiCo 9. *Materials Science Forum*, 2017, vol. 898, pp. 1669–1674.
7. Sajjad U.R., Qingzheng J., Qiulan T. et al. Evolution of microstructure, magnetic properties and thermal stabilities of isotropic alnico ribbons. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 127–132.
8. Vasilevsky N.I. *Development of a dynamically adjustable gyroscope taking into account its vibration characteristics*. Miass: South Ural State Univ., 2018, 77 p.
9. Chirkin D.S., Roslovets P.V., Tatarinov F.V. et al. Reducing the drift of a dynamically tuned gyroscope from launch to launch. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2017, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-01-1579.
10. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Piskorskij V.P. et al. Ring magnets with radial texture for dynamically tuned gyroscopes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S5, pp. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-89-94.
11. Jianjun T., Huanhui Q., Shengen Z. et al. Magnetic properties and microstructure of radially oriented Sm(Co, Fe, Cu, Zr)_z ring magnets. *Materials Letters*, 2007, vol. 61, pp. 5271–5274.
12. Anhua L., Wei L., Huijie W. et al. The study on thermal expansion of sintered Sm₂Co₁₇ magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 4402–4404.
13. Gorlov D.S., Cherednichenko I.V., Valeev R.A., Chesnokov D.V. Improving the corrosion resistance of REM–Fe–B magnets. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-97-107.
14. Demin S.A., Zavarzin S.V., Cherednichenko I.V., Kozlov I.A. Protective anticorrosive coating of magnets of the REM–Fe–B system. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-96-107.
15. Pedziwiatr A.T., Wallace W.E. Structure and magnetism of the R₂Fe_{14-x}Co_xB ferromagnetic Systems (R=Dy and Er). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 66, pp. 63–68.
16. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Rezchikova I.I., Valeev R.A. et al. Comparison of the temperature stability of SmCo and PrDy–FeCo–B magnets. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. S2 (39), pp. 42–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-42-46.
17. Meeran R., Kamal R. A Mossbauer spectroscopic study of Nd₂(Fe_{1-x}Co_x)B at x = 0,13 between 100 K and 700 K. *Journal of the Less-Common Metals*, 1987, vol. 128, pp. 343–350.
18. Zubair A., Shan T., Mozaffar H. Tailoring magnetic properties in 60Fe–27Co–2Mo–1Ti magnetic alloy by Ni and Hf additive. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, vol. 538, p. 169257. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168266.
19. Efremov D.B., Gerasimova A.A. Production of magnets from the material of the Fe–Cr–Co system by selective laser sintering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2021, vol. 64, no. 10, pp. 721–727. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-10-721-727.

20. Generalova K.N. *Regularities of phase transformations and properties of powder magnetic materials based on the Fe–Cr–Co–Si system and non-stoichiometric Cu–Au alloy*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Perm: Publ. House of PNIPU, 2019, 138 p.
21. Marinescu M., McGinnis K., Liu J.F. et al. High $(BH)_{\max}$ permanent magnets with near-zero reversible temperature coefficient of B_R . *Proceedings of 20th International Workshop on rare earth permanent magnets and their applications*. Grete, 2008, pp. 1–6.
22. Ray A.E. Metallurgical behavior of $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ alloys. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 55, pp. 2094–2096.
23. Masato S., Setsuo F., Hitoshi Y. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. *IEEE Transactions on Magnetism*, 1984, vol. 20, pp. 1584–1589.
24. Jiang S.Y., Chen H.Y., Cheng S.F. et al. Magnetic properties of R–Fe–B and R–Fe–Co–Al–B magnets (R=Pr and Nd). *Journal of Applied Physics*, 1988, vol. 64, pp. 5510–5512.
25. Piskorsky V.P., Burkhanov G.S., Ospennikova O.G. et al. Calculation of the temperature coefficient of induction of nanostructured magnetic hard materials Pr–Dy–Fe–Co–B by the molecular field method. *Metally*, 2010, no. 1, pp. 64–67.
26. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
27. Herbst J.F. $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ materials: intrinsic properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, 1991, vol. 63, no. 4, pp. 819–898.
28. Faria R.N., Davies B.E., Brown D.N. et al. Microstructural and magnetic studies of cast and annealed Nd and PrFeCoBZr alloys and HDDR materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 296, pp. 223–228.
29. Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The effect of high concentrations of cobalt on the properties of magnets Pr–Dy–Fe–Co–B and Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 29, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-66-75.
30. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia*: collection of information materials. 3rd ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.

Информация об авторах

Потапов Максим Викторович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; главный научный сотрудник, ФИЦ ПХФ и МХ РАН, office@icp.ac.ru

Пискорский Вадим Петрович, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), Professor, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Chief Researcher, FRC PCP MC RAS, office@icp.ac.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2025.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87

РАЗРАБОТКА УГЛЕ- И СТЕКЛОПРЕПРЕГОВ, ПЕРЕРАБАТЫВАЕМЫХ ВАКУУМНЫМ ФОРМОВАНИЕМ, С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ ИНВАЛИДОВ

К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваев¹, А.Д. Грачева¹, Ф.А. Сабуров¹, А.И. Ткачук¹,
Е.В. Седов², М.Ф.М. Шеббо²

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

²Общество с ограниченной ответственностью «Анатомикс Бионическая Лаборатория», Москва, Россия; filipp.shebbo@antmx.ru

Аннотация. Полимерные композиционные материалы все более активно используются при изготовлении средств реабилитации инвалидов, в частности протезов и ортезов, в том числе с применением препрегов, перерабатываемых методом вакуумного формования. Потребность в материалах в этой отрасли увеличивается. В основном с этой целью используются материалы зарубежного производства, и импортозамещение становится все более актуальным. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия материалов, которые можно использовать для изготовления средств реабилитации инвалидов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, препреги, вакуумное формование, связующее, технологический пакет, оснастка, вакуумирование, пропитка, средства реабилитации инвалидов

Для цитирования: Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Грачева А.Д., Сабуров Ф.А., Ткачук А.И., Седов Е.В., Шеббо М.Ф.М. Разработка угле- и стеклопрепегов, перерабатываемых вакуумным формованием, с пониженной температурой отверждения для изготовления средств реабилитации инвалидов // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87.

Scientific article

DEVELOPMENT OF CARBON AND GLASS PREPREG PROCESSED BY VACUUM MOLDING WITH LOW CURING TEMPERATURE FOR THE MANUFACTURE OF REHABILITATION EQUIPMENT FOR THE DISABLED

K.I. Donetskii¹, R.Yu. Karavaev¹, A.D. Gracheva¹, F.A. Saburov¹, A.I. Tkachuk¹,
E.V. Sedov², M.F.M. Shebbo²

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

²Limited Liability Company «ANATOMIKS», Moscow, Russia; filipp.shebbo@antmx.ru

Abstract. Polymer composite materials are increasingly being used in the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled, particularly in the production of prostheses and orthoses, including the use of prepregs processed by vacuum molding. The demand for materials in this industry is growing steadily, with imported materials primarily used, and import substitution is becoming increasingly important. NRC «Kurchatov Institute» – VIAM has developed a series of materials that can be used in this industry.

Keywords: polymer composite materials, prepregs, vacuum forming, binder, technological package, tooling, vacuuming, impregnation, rehabilitation equipment for the disabled

For citation: Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Gracheva A.D., Saburov F.A., Tkachuk A.I., Sedov E.V., Shebbo M.F.M. Development of carbon and glass prepreg processed by vacuum molding with low curing temperature for the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87.

Введение

В настоящее время автоклавный способ изготовления конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является преобладающим в промышленности ввиду высокого и стабильного качества получаемых изделий [1–4]. Однако существуют определенные ограничения его использования, связанные в первую очередь с высоким энергопотреблением и стоимостью производственного оборудования. Кроме того, строгий государственный контроль безопасности технологических процессов ограничивает широкое распространение автоклавного способа и обеспечивает его доступность лишь крупным производителям изделий из ПКМ [5].

Ввиду увеличивающейся потребности в таких материалах на рынке появляются производители, для которых использование автоклавных процессов является затруднительным. Необходимо внедрение технологических процессов изготовления ПКМ со свойствами, приближенными к характеристикам аналогичных «автоклавных» материалов [6–8]. Одним из таких процессов является вакуумное формование препрегов и семипрегов, позволяющее получать высококачественные пластики с высокими физико-механическими показателями. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны такие материалы – препреги и семипреги на основе эпоксидной матрицы, тканых и однонаправленных наполнителей [9–11], перерабатываемые при температурах до 180 °С. Однако не всем потребителям ПКМ необходимы материалы с такой температурой переработки и, соответственно, повышенной рабочей температурой.

В рамках выполнения исследований проведен ряд работ, включающих разработку как расплавленного эпоксидного связующего, так и угле- и стеклопрепрегов на его основе для переработки методом вакуумного формования при пониженной температуре отверждения (125 °С). Соответственно, исследованы физико-механические свойства полученных материалов для определения основных параметров их использования, в частности при изготовлении технических средств реабилитации инвалидов.

На отечественном рынке в основном представлены импортные материалы, готовые изделия, в частности протезно-ортопедические, зачастую также зарубежного производства. С учетом увеличивающейся потребности в ПКМ и необходимости замещения продукции иностранных производителей опробование разработанных материалов проводили при изготовлении конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы. Такие материалы должны отвечать стандартам изготовления и эксплуатации технических средств реабилитации, иметь четкие и понятные характеристики для инженерных расчетов и составления технологических карт в процессе разработки и планирования производства.

В настоящее время приобретение новых и поддержание в работоспособном состоянии уже установленных технических средств реабилитации зарубежных компаний осложнены или невозможны, что делает особенно актуальным вопрос о локализации производства изделий такого рода. Актуальность исследования конструкций из угле- и стеклопластиков, полученных методом вакуумного формования препрегов, для протезно-ортопедической области обусловлена несколькими факторами [12–14]:

– уникальное сочетание свойств ПКМ (высокая прочность и жесткость при сравнительно малой массе, что критически важно для создания комплектующих узлов протезов и ортезов, которые должны быть одновременно прочными и комфортными для пользователя);

– вакуумное формование препрегов позволяет создавать сложные по форме изделия с высокой точностью, что особенно ценно при изготовлении индивидуальных конструкций протезов и обеспечивает уровень комфорта, учитывающий анатомические особенности пациента;

– использование угле- и стеклопластиков открывает возможности для создания узлов протезов с улучшенными функциональными характеристиками. Например, можно точнее моделировать биомеханику естественного движения суставов, увеличивать устойчивость к нагрузкам и износу, а также интегрировать в конструкцию электроды и другие компоненты для создания микропроцессорных узлов для протезов.

Материалы и методы

В процессе разработки угле- и стеклопрепрегов, перерабатываемых методом вакуумного формования, с пониженной температурой отверждения для изготовления средств реабилитации инвалидов выполнены технологические операции:

– по разработке и изготовлению связующего марки ВСЭ-80 (выбор исходных компонентов, подбор режимов изготовления и оптимизация состава, исследование свойств и выпуск нормативной документации);

– по изготовлению угле- и стеклопрепрегов марок ВКУ-75 и ВПС-77 соответственно на основе разработанного связующего (оптимизация и подбор режимов изготовления, исследование свойств и выпуск нормативной документации);

– по изготовлению образцов угле- и стеклопластиков на основе полученных препрегов (определение оптимальной схемы сборки технологических пакетов для двух типов материалов, выбор режима отверждения и исследование физико-механических свойств ПКМ);

– по изготовлению конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы (выбор оптимальной формы, оценка расчетной модели изделия в нагруженном состоянии, определение геометрических параметров элементов, отработка технологии изготовления изделий и их исследование методами ультразвукового контроля и рентгеновской компьютерной томографии с целью оценки качества полученных образцов).

Результаты и обсуждение

Разработка и изготовление связующего

Применяемые в промышленности термореактивные полимерные связующие, перерабатываемые с использованием автоклавной и безавтоклавной (вакуумной) технологий, должны обладать следующими свойствами:

- длительный период хранения;
- непродолжительное формообразование и сравнительно невысокая температура доотверждения для улучшения энергоэффективности процесса получения деталей из ПКМ;
- узкий интервал реологических характеристик связующего, подходящих для выбранного метода переработки [15, 16].

Физико-механические и термомеханические характеристики ПКМ напрямую зависят от типа и состава используемого наполнителя и связующего, поскольку в процессе формообразования и последующего доотверждения в результате физико-химических и химических процессов связующее превращается в трехмерную сшитую матрицу, обеспечивающую монолитность конструкционного материала в целом. Существенное влияние на прочностные характеристики ПКМ оказывают качество пропитки наполнителя связующим и адгезия наполнителя к матрице, а также выбранные методы формования и подготовки вакуумных пакетов [17].

Критически важными характеристиками ПКМ, напрямую зависящими от состава и свойств наполнителя и матрицы, являются физико-механические свойства, деформационная устойчивость, тепло-, термо-, влаго- и атмосферостойкость.

Важнейшими технологическими характеристиками связующего являются время гелеобразования, величина экзотермического эффекта в момент максимальной скорости процесса отверждения, исходные реологические характеристики и динамика их изменения в процессе переработки. Перечисленные характеристики определяют выбор оптимальной технологии переработки связующего в соответствии с конструктивными и геометрическими особенностями изготавливаемых деталей [18–20].

Среди термореактивных связующих, удовлетворяющих большинству данных требований, наиболее часто используются эпоксидные связующие. Основным компонентом эпоксидных связующих является смесь реакционноспособных эпоксидных олигомеров с отвердителями [21–24]. Химическая природа, характер молекулярно-массового распределения, содержание и стерическая доступность реакционноспособных групп и, как следствие, надмолекулярная структура эпоксидного олигомера определяют технологические, термомеханические и прочностные свойства материала. Для отверждения эпоксидных смол используются отвердители различных типов (аминные, ангидридные, каталитические).

Разработано расплавное эпоксидное связующее марки ВСЭ-80, процесс изготовления которого включает получение форполимера и отверждающей пасты, синтез связующего, слив готового продукта из реактора, отбор проб и контроль качества. Связующее марки ВСЭ-80 обладает следующими свойствами:

Внешний вид	Вязкая масса желтовато-кремового цвета
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре переработки $80,0 \pm 1,0$ °С, Па·с (не более)	18,5
Время гелеобразования при температуре отверждения 125 ± 2 °С, мин (не более)	42
Температура стеклования отвержденного связующего, °С (не менее)	130

Изготовление угле- и стеклопрепрегов на основе связующего марки ВСЭ-80

С использованием разработанного связующего на пропиточной установке для изготовления препрегов получены угле- и стеклопрепреги, стадии процесса представлены на рис. 1.

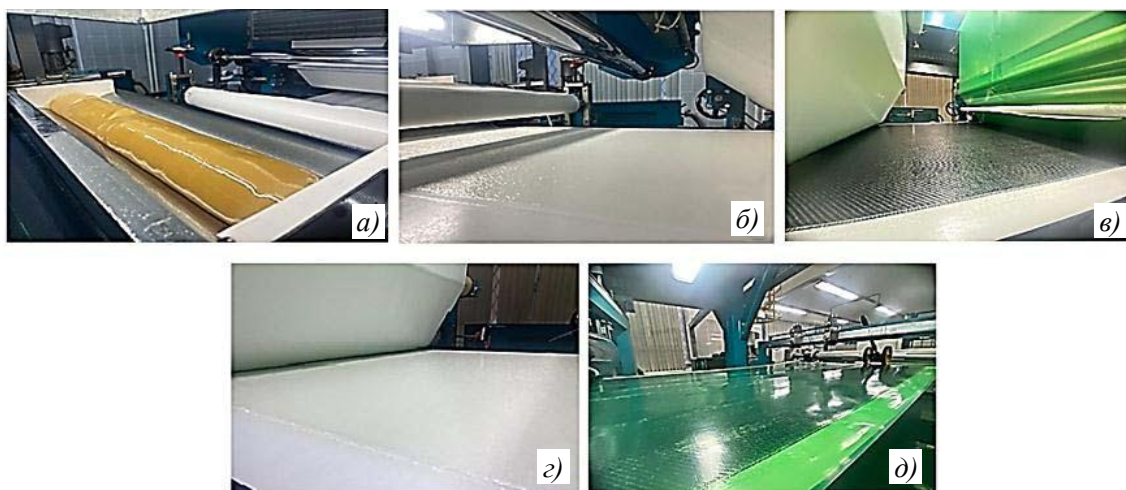


Рис. 1. Основные стадии изготовления препрегов на пропиточной установке: *а* – разогрев партии расплавного эпоксидного связующего на валах пропиточной установки; *б* – изготовленная пленка расплавного эпоксидного связующего; *в*, *г* – совмещение угле- и стеклонаполнителей с полученной пленкой связующего; *д* – совмещение изготовленного препрега с защитной полиэтиленовой пленкой

Исследованы свойства полученных образцов угле- и стеклопрепрегов (табл. 1).

Таблица 1

**Свойства образцов угле- и стеклопрепрегов, полученных на основе
расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-80**

Характеристика	Нормативная документация	Значения характеристик для образца	
		углепрепрега	стеклопрепрега
Жизнеспособность, сут	ГОСТ Р 56755–2015	30	30
Содержание связующего, % (по массе)	ГОСТ Р 56796–2015	38,2–39,4	37,7–38,4
Ширина препрега, мм	ГОСТ 29104.1–91	995–996	927
Поверхностная плотность (среднее значение), г/м ²	ГОСТ 32649–2014	326	473,9

Для изготовителя продукции важным параметром является жизнеспособность препрега. Это соотношение значений теплового эффекта, определенных методом дифференциальной сканирующей калориметрии, для образцов препрега угле- и стеклопластиков в исходном состоянии и после хранения при температуре 23 ± 2 °С в течение 30 сут. Установлено, что в образцах препрега угле- и стеклопластика соотношение значений теплового эффекта изменяется незначительно (<15 %). Химическая реакция в данных условиях не происходит, следовательно, они пригодны для переработки в ПКМ после хранения при температуре 23 ± 2 °С в течение 30 сут.

Изготовление образцов угле- и стеклопластиков

С использованием полученных образцов угле- и стеклопрепрегов изготовлены образцы угле- и стеклопластиков, исследованы их физико-механические свойства (табл. 2).

Таблица 2

Свойства полученных образцов угле- и стеклопластиков

Характеристика	Значения характеристик для образца	
	углепластика ВКУ-75	стеклопластика ВПС-77
Объемная доля пор, %	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$
Плотность, г/см ³	1,51	1,83
Температура стеклования $T_{g \text{ dry}}$, °С	135	134
Степень отверждения, %	99	98
Предел прочности при растяжении при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, МПа	1031	620
Модуль упругости при растяжении при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, ГПа	59	26
Предел прочности при изгибе при температуре 23 ± 3 °С, МПа	965	817
Предел прочности при сдвиге при температуре 23 ± 3 °С, МПа	71	70
Предел прочности при сжатии при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, МПа	625	519

На рис. 2 представлены С-сканы плит стекло- и углепластиков.

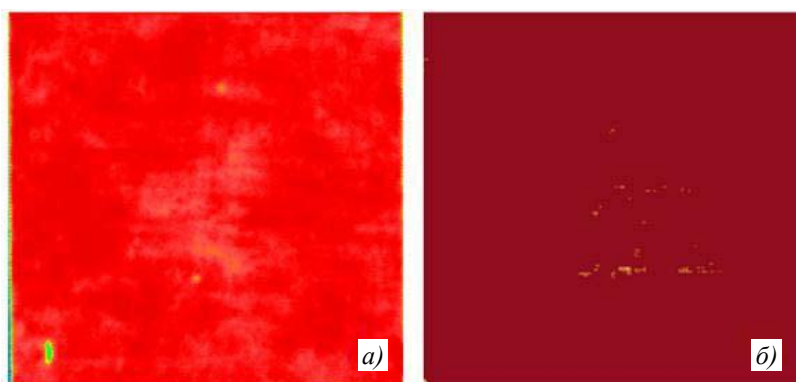


Рис. 2. С-сканы плит стекло- (а) и углепластиков (б)

Установлено, что в плитах угле- и стеклопластиков не выявлены области повышенного затухания с уменьшением амплитуды донного эхосигнала, превышающим уровень фиксации (более чем в 2 раза), что подтверждается однородной цветовой гаммой. Полученные плиты угле- и стеклопластиков по структуре однородны.

Результаты испытаний показали достаточность заявленной температуры отверждения материалов (125 °С), что подтверждается высокими значениями степени отверждения, характерными для полностью отвержденных пластиков. Полученные значения механических свойств также соответствуют показателям материалов, выполненных на основе тканых угле- и стеклонаполнителей.

Изготовление конструктивно-подобных образцов фрагмента модуля стопы

Совместно с ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория» изготовлены конструктивно-подобные образцы панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы с учетом ожидаемых требований к эксплуатации технических средств реабилитации.

Современные фрагменты модуля стопы [25–28] представляют собой изогнутую плоскую пружину, изготовленную из угле- или стеклопластиков, имитирующую естественную механику бега (рис. 3).



Рис. 3. Примеры фрагментов модуля стопы S- (а), С- (б) и J-образных (в) форм, изготовленных из полимерных композиционных материалов зарубежными производителями

В настоящее время используют три основные геометрические формы модуля стопы (S-, С- и J-образные), каждая из которых имеет достоинства и недостатки (табл. 3)

[29–31]. S-образная форма модуля стопы представляет собой профиль с переменным изгибом; С-образная – производится чаще и пользуется спросом у большого количества пользователей; J-образная – обладает преимуществами обеих форм модуля стопы.

Таблица 3

Форма модуля стопы	Преимущества	Недостатки
S-образная	Лучше поглощает разнонаправленные нагрузки, возникающие при отталкивании во время бега, за счет нескольких последовательных зон деформации. Имеет более плавный перекал, имитирующий естественную биомеханику стопы. За счет большей жесткости обеспечивает хорошую устойчивость к боковым и скручивающим нагрузкам	Имеет низкий коэффициент полезного действия, взаимная компенсация изгибов снижает возврат энергии при отталкивании. Точки перегиба являются концентраторами напряжений и снижают сопротивление усталости изделия. Наличие концентраторов напряжений в точках перегибов вынуждает усиливать эти зоны, что ведет к увеличению общей массы изделия. Сложная форма изделия может привести к трудностям при формовке углепластика ввиду необходимости дополнительного контроля в зонах перегиба
С-образная	Благодаря простой форме с одним работающим радиусом осуществляется эффективная передача энергии. Единственный перегиб позволяет управлять жесткостью и получать предсказуемое поведение изделия при прямолинейном движении во время бега. Имеет меньшую массу по сравнению с S-образной формой за счет плавного уменьшения толщины и меньшего количества концентраторов напряжений	Высокая жесткость изделия ограничивает возможности его применения при беге. По этой же причине такая стопа имеет более жесткое приземление и отталкивание, что создает дополнительную ударную нагрузку на суставы. Стопа имеет фиксированную «строительную высоту». Это означает, что ее могут использовать только люди с определенной длиной ампутированной конечности
J-образная	Обеспечивает максимальный возврат энергии при отталкивании, коэффициент полезного действия достигает 90 %. За счет длинного плеча происходит очень плавное нагружение протеза при ударе о поверхность, при этом амортизация лучше, чем у любой другой формы. Универсальна для разных дистанций и видов бега, так как позволяет управлять жесткостью при расчете изделия. Открытая форма с одним рабочим радиусом способствует равномерному распределению напряжений по всему объему композита, что увеличивает ресурс изделия. Выкладка композита на открытой форме проще, чем для S-образной формы, и не сложнее, чем для С-образной, что позволяет минимизировать ошибки при производстве. Расположение крепления на вертикальной части протеза позволяет подстроить «строительную высоту» протеза под конкретного пользователя и подходит для большого диапазона длины ампутированной конечности	—

Таким образом, J-образная форма выбрана базовой как отвечающая всем требованиям потребителей данных средств реабилитации и имеющая хорошую референсную базу, которая позволит в перспективе проанализировать готовое изделие и сравнить с аналогами, уже распространенными и применяющимися для реабилитации инвалидов в разных странах.

Проведена оценка расчетной модели изделия в нагруженном состоянии (рис. 4).

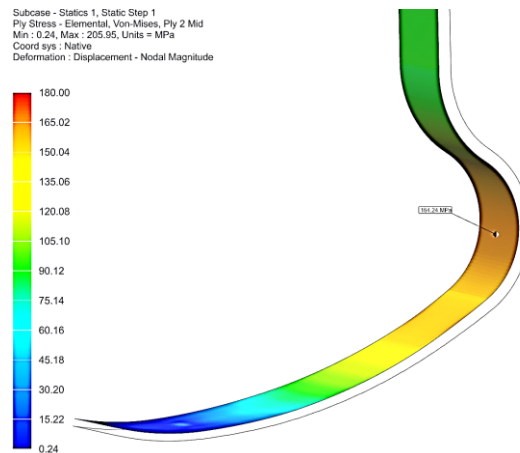


Рис. 4. Расчетная модель модуля стопы J-образной формы в нагруженном состоянии

Цвет модели отражает напряжения, которые возникают в изделии при испытании. Видно, что основную работу выполняет дуга, расположенная под местом крепления протеза, далее напряжения стремятся к нулю в носочной части.

С учетом существующих широко распространенных и уже реализованных на рынке образцов модуля стопы определены геометрические параметры элементов изделия (рис. 5).

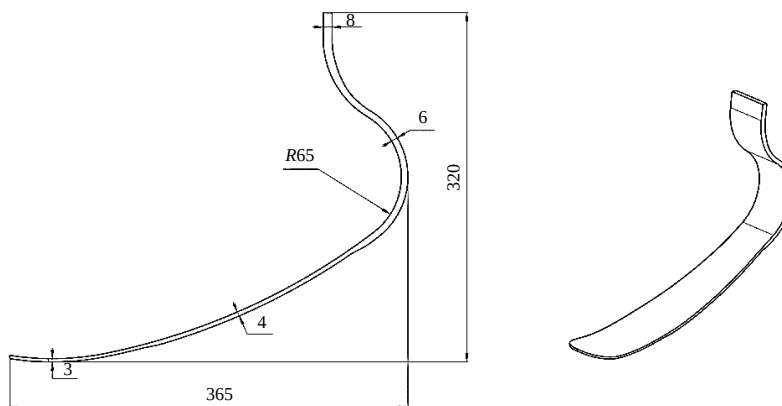


Рис. 5. Выбранные геометрические параметры для элементов изделия

В таком исполнении стопа будет иметь достаточную жесткость в месте крепления и позволит должным образом отрабатывать силу реакции опоры при отталкивании, обеспечивая стабильный толчок. Длинное плечо позволит эффективно отталкиваться, сохраняя значительное количество энергии от загрузки пружинящей части [32].

Для получения экспериментальных конструктивно-подобных образцов фрагмента модуля стопы отработана технология изготовления образцов сложной геометрической формы.

Основной технологической задачей являлось предотвращение образования дефектов в виде складок и наслоения материала, возникающих из-за значительной толщины пакета и сложности рельефа оснастки. Показано, что для пакета большой толщины многоступенчатая укладка с сокращенным количеством слоев на каждом этапе является необходимым условием для обеспечения высокого качества поверхности и формы детали.

Кроме того, показано, что важным фактором получения качественных образцов является выбор материала цулаг. В частности, использование цулаг из чрезмерно жестких материалов большой толщины приводило к искажению формы детали и появлению напряжений во внутренних углах. Цулаги из чрезмерно мягких материалов (например, лакоткань, тонкий текстолит) формировали излишне подробную ответную часть, повторяя все локальные сбеги материала и неровности, что также негативно сказывалось на распределении давления.

Оптимальным решением является использование тонких металлических цулаг, которые обеспечивают баланс между жесткостью, необходимой для поддержания общей формы, и гибкостью, достаточной для эффективного «сдавливания» препрега в технологическом пакете.

В результате проведенных мероприятий разработан и успешно апробирован технологический процесс, позволяющий изготавливать детали сложной формы без дефектов. Ключевыми факторами успеха стали многоступенчатая сборка пакета, корректный подбор материала и конфигурации вспомогательных слоев, а также адаптация режима отверждения под специфические условия процесса.

На рис. 6 приведены стадии подготовки сборки вакуумного технологического пакета.



Рис. 6. Стадии подготовки сборки вакуумного технологического пакета: *а* – выложенный препрег на формообразующей оснастке с «лицевой» цулагой; *б* – сборка с жертвенной тканью; *в* – сборка после отверждения связующего; *з* – экспериментальные конструктивно-подобные образцы панелей корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы из угле- и стеклопластиков

Для подтверждения качества обработки процесса изготовления фрагмента модуля стопы из угле- и стеклопластиков проведены исследования методами ультразвукового контроля и рентгеновской компьютерной томографии. Ультразвуковой контроль эхоимпульсным методом в ручном режиме подтвердил отсутствие дефектов и расслоений во фрагменте модуля стопы (рис. 7).

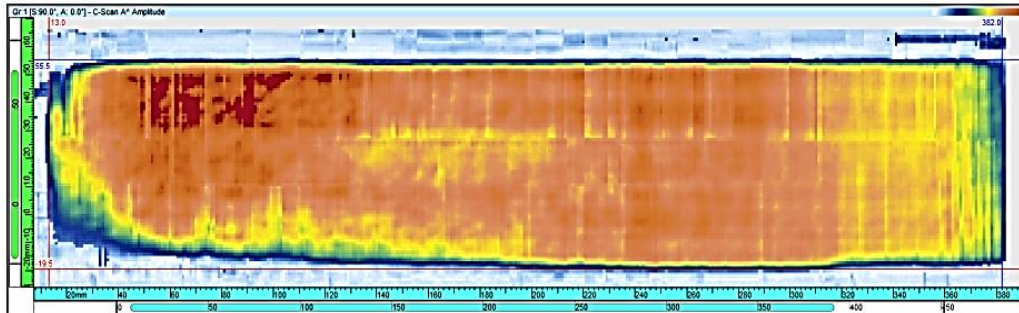


Рис. 7. C-скан образца фрагмента модуля стопы

Проведенные исследования образцов как угле-, так и стеклопластиков методом рентгеновской компьютерной томографии также показали отсутствие внутренних дефектов и наличие пористости, не превышающей 1,5 % (рис. 8).

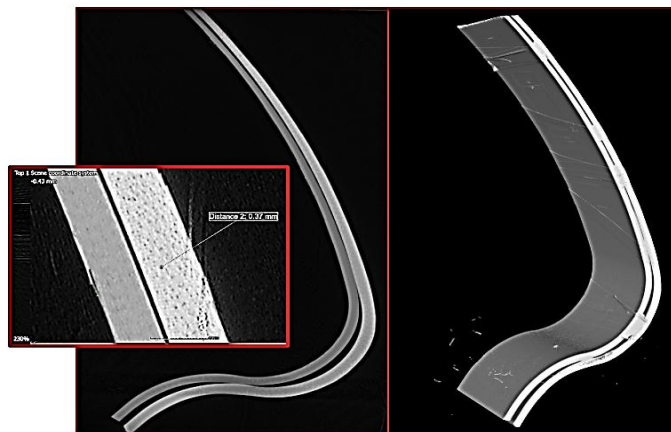


Рис. 8. Типичные изображения образца фрагмента модуля стопы в разных плоскостях, полученные методом рентгеновской компьютерной томографии

Для подтверждения правильности выбранного режима отверждения препрегов при изготовлении угле- и стеклопластиков определена степень отверждения материалов, которая составила 98,0 и 97,5 % соответственно.

Заключения

Разработаны связующее, угле- и стеклопрепреги, перерабатываемые методом вакуумного формования, с пониженной температурой отверждения, а также материалы на их основе для широкого использования в отраслях промышленности, где есть потребность производства изделий из ПКМ энергоэффективными методами с использованием дешевых процессов переработки, в том числе при изготовлении средств реабилитации инвалидов. С учетом увеличения потребности в материалах в этой отрасли и превалирования в настоящее время материалов зарубежного производства их импортозамещение становится все более актуальным.

Разработанные материалы с пониженной температурой отверждения опробованы при изготовлении конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы. Постоянно увеличивающийся спрос на протезно-ортопедические изделия и направленность на улучшение качества жизни пациентов, появление новых технологий обработки композиционных материалов делают исследования в этой области чрезвычайно актуальными и необходимыми.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-012 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 04.07.2023 об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. 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: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 536 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением». URL: <http://www.infobm.ru/upload/Правила%20промышленной%20безопасности%20при%20использовании%20оборудования.pdf> (дата обращения: 10.10.2025).
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Бабаевский П.Г., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.
8. Berring N.S., Renieri M.P., Bond G.G., Palmer D.J. Autoclave vs. Non-Autoclave: A comparison of hat-stiffened subcomponents by static and fatigue testing and related non-destructive evaluations // 2012 SAMPE International Symposium and Exhibition-Emerging Opportunities: Materials and Process Solutions. Baltimore, MD, 2012. P. 23–25.
9. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Грачева А.Д., Ткачук А.И. Семипреги и углепластики на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
10. Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Сафронов А.М., Гончаров В.А., Мишун М.И. Безавтоклавное формование препрегов // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1 (165). С. 29–34.
11. Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

12. Якобсон Я.С., Кужекин А.П., Самойлов Д.В., Шишкин Б.В. Энергосберегающие протезы нижних конечностей // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 129.
13. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Рудаков Р.Н. Математическое моделирование и оптимизация конструкции упругого элемента протеза стопы // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 87–88.
14. Борисов И.М., Резник С.В. Разработка композитной конструкции биомеханического назначения // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 348–354. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354.
15. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
16. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
17. Михайлин Ю.А. Термореактивные связующие ПКМ // Полимерные материалы. 2009. № 2. С. 40–45.
18. Панина Н.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Гребенева Т.А., Гуревич Я.М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 9. С. 10–17.
19. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. СПб: Профессия, 2020. 550 с.
20. Мостовой А.С. Рецептурная модификация эпоксидных смол с использованием новых высокоэффективных пластификаторов // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 7. С. 66–70.
21. Чеботарева Е.Г., Огрель Л.Ю. Современные тенденции модификации эпоксидных полимеров // Фундаментальные исследования. 2008. № 4. С. 102–104.
22. Бобылев В.А. Специальные эпоксидные смолы для клеев и герметиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. Т. 5. С. 8–12.
23. Загора А.Г. Применение дициандиамида в составе эпоксидных клеев, связующих и ПКМ на их основе (обзор) // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 4. С. 35–37.
24. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 108 с.
25. Галимзянова Р.Ю. Современные композиционные материалы в производстве медицинской техники: учеб. пособие. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. 89 с.
26. Romo H.D. Specialized prostheses for activities: an update // Clinical Orthopaedic Related Research. 1999. Vol. 361. P. 63–70.
27. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Перспективы использования полимерных композиционных материалов при изготовлении протезов (обзор) // Пластические массы. 2021. № 5-6. С. 40–43. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-40-43.
28. Scholz M.-S., Blanchfield J.P., Bloom L.D. et al. The use of composite materials in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: A review // Composites Science and Technology. 2011. Vol. 71. P. 1791–1803.
29. Nolan L. Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review // The Journal of Foot and Ankle Surgery. 2008. Vol. 14 (3). P. 125–129.
30. McCarvill S. Essay: prosthetics for athletes // The Lancet. 2005. Vol. 366 (1). P. 10–11.
31. Berry D.A. Composite material for orthotics and prosthetics // Orthotics and Prosthetics. 1987. Vol. 40 (4). P. 35–43.
32. Tryggvason H., Starker F., Lecompte Ch., Jonsdottir F. Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot // Proceedings of the 58th SIMS. Reykjavik, 2017. P. 398–404.

References

1. 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), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-349-367.
4. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
5. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of December 15, 2020 No. 536 «On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety «Industrial safety rules for the use of equipment operating under excess pressure». Available at: <http://www.infobm.ru/upload/Правила%20промышленной%20безопасности%20при%20использовании%20оборудования.pdf> (accessed: October 10, 2025).
6. Mikhaylin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013, 720 p.
7. Babaevsky P.G., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Structural Plastics (Therapeutic Plastics)*. Ed. E.B. Trostyanskaya. Moscow: Khimiya, 1974, 304 p.
8. Berring N.S., Renieri M.P., Bond G.G., Palmer D.J. Autoclave vs. Non-Autoclave: A comparison of hat-stiffened subcomponents by static and fatigue testing and related non-destructive evaluations. *2012 SAMPE International Symposium and Exhibition-Emerging Opportunities: Materials and Process Solutions*. Baltimore, MD, 2012, pp. 23–25.
9. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D., Tkachuk A.I. Semipregs and carbon fiber reinforced plastics based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 21, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
10. Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Safronov A.M., Goncharov V.A., Mishchun M.I. Autoclave-free molding of prepregs. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2022, no. 1 (165), pp. 29–34.
11. Tkachuk A.I., Kyznecova P.A., Donetskii K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
12. Yakobson Ya.S., Kuzhekin A.P., Samoilov D.V., Shishkin B.V. Energy-saving lower limb prostheses. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 1999, vol. 3, no. 2, p. 129.
13. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. Mathematical modeling and optimization of the design of an elastic element of a foot prosthesis. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 1999, vol. 3, no. 2, pp. 87–88.
14. Borisov I.M., Reznik S.V. Development of a composite structure for biomechanical purposes. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernyye issledovaniya*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 348–354. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354.
15. Tkachuk A.I., Donetskii K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: October 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
16. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
17. Mikhailin Yu.A. Thermosetting Binders of Polymeric Composites. *Polimernye materialy*, 2009, no. 2, pp. 40–45.
18. Panina N.N., Chursova L.V., Babin A.N., Grebeneva T.A., Gurevich Ya.M. Main Methods of Modifying Epoxy Polymer Materials in Russia. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2014, no. 9, pp. 10–17.
19. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. *Epoxy Resins, Hardeners, Modifiers, and Binders Based on Them*. St. Petersburg: Profession, 2020, 550 p.
20. Mostovoy A.S. Formulation modification of epoxy resins using new highly effective plasticizers. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii*, 2015, no. 7, pp. 66–70.

21. Chebotareva E.G., Ogrel L.Yu. Modern trends in the modification of epoxy polymers. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2008, no. 4, pp. 102–104.
22. Bobylev V.A. Special epoxy resins for adhesives and sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, vol. 5, pp. 8–12.
23. Zagora A.G. Use of dicyandiamide in epoxy adhesives, binders and polymer composite materials based on them (review). *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 4, pp. 35–37.
24. Li H., Neville K. *Reference Guide to Epoxy Resins*. Moscow: Energia, 1973, 108 p.
25. Galimzyanova R.Yu. *Modern Composite Materials in the Production of Medical Equipment: A Textbook*. Kazan: Kazan National Research Tech. Univ., 2021, 89 p.
26. Romo H.D. Specialized prostheses for activities: an update. *Clinical Orthopaedic Related Research*, 1999, vol. 361, pp. 63–70.
27. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V., Grigorieva L.N. Prospects for the use of polymer composite materials in the manufacture of prostheses (review). *Plasticheskie massy*, 2021, no. 5-6, pp. 40–43. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-40-43.
28. Scholz M.-S., Blanchfield J.P., Bloom L.D. et al. The use of composite materials in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: A review. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 1791–1803.
29. Nolan L. Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 2008, vol. 14 (3), pp. 125–129.
30. McCarvill S. Essay: prosthetics for athletes. *The Lancet*, 2005, vol. 366 (1), pp. 10–11.
31. Berry D.A. Composite material for orthotics and prosthetics. *Orthotics and Prosthetics*, 1987, vol. 40 (4), pp. 35–43.
32. Tryggvason H., Starker F., Lecompte Ch., Jonsdottir F. Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot. *Proceedings of the 58th SIMS*. Reykjavik, 2017, pp. 398–404.

Информация об авторах

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

Караваяев Роман Юрьевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Грачева Алена Дмитриевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сабуров Федор Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Седов Егор Владимирович, ведущий инженер, ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория», egor.sedov@antmx.ru

Шеббо Монзер Филипп Мохамед, генеральный директор, ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория», filipp.shebbo@antmx.ru

Information about the authors

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

Roman Yu. Karavaev, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alyona D. Gracheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fedor A. Saburov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Egor V. Sedov, Leading Engineer, LLC «Anatomics», egor.sedov@antmx.ru

Monzer Philip Mohamed Shebbo, General Director, LLC «Anatomics», filipp.shebbo@antmx.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.11.2025.
The article was submitted 19.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.11.2025.

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-88-100

ПОВРЕЖДЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПОСЛЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УДАРА: ОБЗОР МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

Д.Д. Иванов¹, А.М. Губин¹

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

Аннотация. Рассмотрены этапы развития трещины в структуре полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих наполнителей при приложении ударных нагрузок. Процесс разрушения представляет собой последовательность событий, в которой скорость образования и закрепления дефектов зависит от фундаментальных постоянных материала. Механизмы образования повреждений ПКМ с различными схемами армирования в значительной степени различаются. Показаны характерные типы разрушения. Обоснована практическая необходимость выявления среди прочих факторов, влияющих на ударную стойкость углепластика, воздействия окружающей среды.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, удар падающим грузом, ударопрочность, трещиностойкость, расслоение, сжатие после удара

Для цитирования: Иванов Д.Д., Губин А.М. Повреждение углепластиков после низкоэнергетического удара: обзор механизма разрушения и влияния эксплуатационных условий // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-88-100.

Scientific article

DAMAGE OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER AFTER LOW-ENERGY IMPACT: A REVIEW OF FAILURE MECHANISM AND INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS

D.D. Ivanov¹, A.M. Gubin¹

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 stages of crack development in the structure of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) when impact loads are applied. The fracture process is a sequence of events in which the rate of formation and consolidation of defects occurs depending on the fundamental constants of the material. The mechanisms of damage formation for polymer composite materials (PCMs) with different reinforcement architectures are significantly different. Typical types of destruction are shown. The practical necessity of identifying, among other factors affecting the impact resistance of carbon fiber reinforced polymer, environmental influences is substantiated.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber reinforced polymer, drop weight impact, impact resistance, crack resistance, delamination, compression after impact

For citation: Ivanov D.D., Gubin A.M. Damage of carbon fiber reinforced polymer after low-energy impact: a review of failure mechanism and influence of operating conditions. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-88-100.

Введение

В современном мире стремительно меняются требования к функционалу и качеству используемых материалов. Достижения в области авиастроения последних лет [1, 2] диктуют разработчикам современных материалов необходимость постоянно совершенствовать их свойства. В конструкции летательных аппаратов уже достаточно распространены полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные углеродным волокном, поэтому в некотором смысле они даже стали привычны [3, 4]. Однако развитие технологий производства этих материалов не останавливается [5]. В настоящее время углепластики, производимые в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, изготавливаются на основе ряда компонентов российского производства, поэтому можно утверждать, что Россия заметно приближается к достижению технологического суверенитета в этой сфере [6].

Воздействие ударных нагрузок на внешние поверхности летательного аппарата может быть осуществлено твердыми частицами при взлете и посадке, а также при проведении ремонтных работ [7]. Для слоистых ПКМ одним из самых опасных видов воздействий является удар в поперечном направлении относительно укладки армирующих слоев композиционного материала [8]. Последствием ударного воздействия является образование внутренних дефектов, таких как расслоения, микротрещины в матрице и разрывы волокон, которые могут существенно снижать прочность конструкции, а диагностика этих повреждений затруднена из-за отсутствия видимых следов на поверхности материала и предполагает наличие специального оборудования для проведения неразрушающего контроля. Работы, связанные с созданием углепластика в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, начинаются с разработки технического задания в соответствии с требованиями к параметрам узла конструкции [9], в связи с чем решается задача увеличения стойкости ПКМ к ударным воздействиям [7, 10, 11].

Несмотря на обширные исследования в области механики разрушения ПКМ, влияние реальных условий эксплуатации (таких как температурные воздействия, термовлажностное старение и многократные ударные нагрузки) требует более детального изучения с целью дальнейшего практического применения. Кроме того, существует относительно небольшое количество работ, посвященных детальному анализу механизма повреждений углепластиков при ударе, что затрудняет разработку надежных методик прогнозирования остаточной прочности материалов.

Данная обзорная статья посвящена анализу механизмов повреждений углепластиков при ударных нагрузках и влиянию энергии удара и структуры армирования на них. Отдельное внимание уделяется влиянию эксплуатационных условий на формирование и развитие повреждений. Развитие данной области исследований позволит повысить надежность конструкций из ПКМ и уточнить методики прогнозирования их долговечности в условиях эксплуатации.

Механизм образования повреждений после удара

Изучение механизма образования повреждений при ударе приводит к пониманию основных факторов, определяющих структурные характеристики и, как следствие, эксплуатационные свойства конструкции из ПКМ при ударном воздействии. Вследствие анизотропной природы ПКМ и неравномерного распределения напряжений механизм повреждения сложно описать одной универсальной гипотезой из-за многоступенчатости процесса.

Механические испытания путем нанесения удара классифицируются по величине скорости в момент контакта ударника и испытываемого образца. Это связано с тем, что повреждение материала зависит от продолжительности соприкосновения

ударника и образца, а также влияет на распространение упругих волн и масштабируемость зоны деформации образца. Существуют следующие виды нанесения удара, классифицируемые в зависимости от скорости: низкоскоростной (≤ 10 м/с), высокоскоростной (> 10 м/с) и баллистический (> 500 м/с) [12]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведены исследования, которые показали, что изменение скорости удара при постоянном уровне энергии при низкоскоростных испытаниях не оказало влияния на остаточную прочность при сжатии после удара и площадь повреждения углепластика [11].

При баллистическом ударе упругие волны деформации не успевают достичь границ структуры, из-за чего деформация локализуется в сверхкомпактной зоне удара [13]. При высокоскоростном ударе деформации контролируются изгибными и сдвиговыми волнами и локализуются как минимум в области вблизи удара, сравнимой с одним-двумя диаметрами бойка [12, 13]. При низкоскоростном ударе продолжительность удара намного больше, чем время, за которое волны достигают границ структуры, из-за чего результирующее напряжение можно считать квазистатическим. Высокоскоростной и низкоскоростной удары могут вызывать едва заметные глазу повреждения, а также скрытые внутрискруктурные дефекты. Однако их последствия могут быть критическими, особенно если факт удара останется незамеченным или будет оцениваться только по внешним признакам. Внутрискруктурные изменения при ударе развиваются по установленному механизму, что и является предметом изучения данной обзорной статьи.

Так, скорость удара напрямую влияет на зону, подверженную деформации, но масштаб деформации зависит не только от этой скорости, а в совокупности от переданной энергии. В работе [14] предполагается, что в зависимости от энергии удара деформации внутри образца могут пойти по трем вариантам, изображенным на рис. 1:

- образцы обладают квазиупругим поведением, так как доля поглощенной энергии очень мала;
- образцы демонстрируют некоторые виды внутренних повреждений, которыми являются трещины в матрице и расслоения;
- образцы демонстрируют множество типов разрушений (например, разрыв волокна, трещину в матрице, расслоения и пробой).

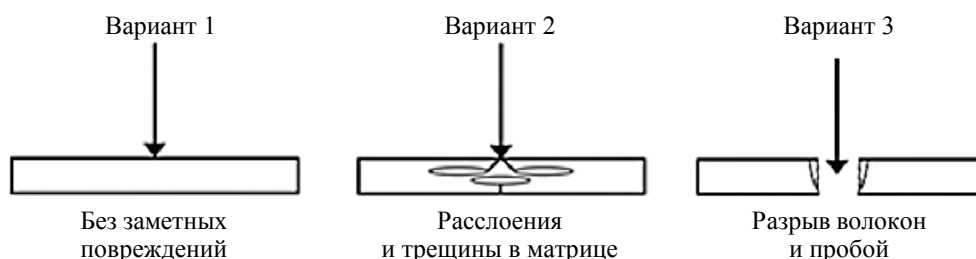


Рис. 1. Классификация уровня энергии удара в зависимости от нанесенного повреждения [15]

Зарождение трещины

Зарождение микротрещин в структуре матрицы (из-за ее природной хрупкости) происходит на всех уровнях и зависит не только от поглощенной энергии удара, но и от геометрических параметров образца, в частности от толщины [16].

Так, углепластик большей толщины менее гибок под воздействием прикладываемых нагрузок, что приводит к высокой концентрации сжимающих и сдвиговых напряжений в зоне под местом удара в сравнении с растягивающими напряжениями в нижних слоях. В дальнейшем рост повреждений распространяется сверху вниз от места удара (рис. 2, а).

Тонкие углепластики (толщиной <4 мм) подвержены высоким концентрациям растягивающих напряжений на противоположной от удара стороне углепластика, что вызывает здесь растрескивание матрицы и локальные деформации в месте удара. Поэтому характеристики повреждений тонкого образца, происходящие в основном на задней поверхности, трудно обнаружить в конструкциях. Дальнейший рост повреждений распространяется снизу вверх и образует инвертируемую картину разрушения толстых ПКМ (рис. 2, б).

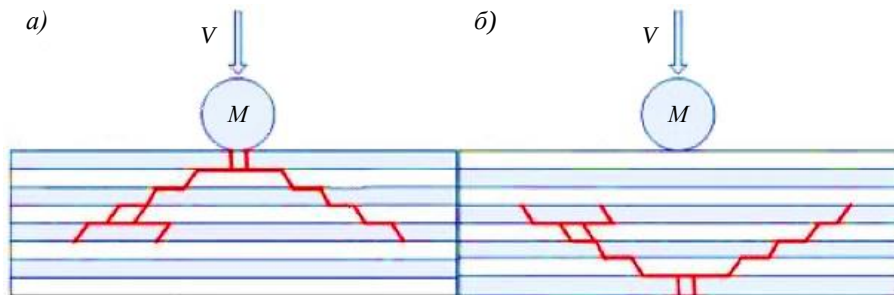


Рис. 2. Типичные механизмы повреждений толстых (а) и тонких (б) образцов углепластика [16]

В верхних слоях однонаправленного углепластика ударные нагрузки вызывают продольные сжимающие напряжения, которые приводят к деформации отдельных волокон внутри слоя, в том числе к микропотере устойчивости и кручению волокон в процессе излома (рис. 3, б). Микропотеря устойчивости – это процесс локального изгиба или смещения отдельных волокон относительно своей оси, возникающий при критическом уровне продольных сжимающих напряжений [17]. Возникающие напряжения сдвига приводят к деформации отдельных волокон внутри слоя. После возникновения микропотери устойчивости отдельных волокон реализуется механизм кручения волокна в процессе излома, что приводит к разрушению межфазной границы «волокно–матрица» и появлению сдвиговой деформации в матрице (рис. 3, г), направление которой будет иметь наклон ~ 45 градусов к оси приложения нагрузки, а интенсивность – представлять градиент от места удара [17].

В тканых ПКМ сжимающие напряжения равномерно распределяются по площади ткани, что снижает вероятность микропотери устойчивости отдельных волокон. Наличие переплетений ограничивает перемещение волокон и минимизирует вероятность возникновения кручения волокна. Волокна в местах пересечения изогнуты, что вызывает локализацию остаточных напряжений в этих участках. Эти места представляют собой концентраторы напряжений, в которых под действием нагрузки начнется процесс разрыва волокон или растрескивание матрицы.

В средних слоях однонаправленных углепластиков образование микротрещин локализуется в межфазной зоне, а для тканых – уязвимой зоной концентрации напряжений является матрица между пересечениями утка и основы. Микротрещины в средних слоях также могут являться следствием роста трещин и последующих расслоений, что свойственно однонаправленным углепластикам. Для тканевых углепластиков расслоения в средних слоях образуются реже из-за равномерного распределения нагрузок, что обусловлено структурой ткани.

Трещина в нижних слоях называется изгибающей трещиной, потому что она вызвана высокими растягивающими напряжениями изгиба и имеет характерную вертикальную форму для однонаправленных углепластиков, что приводит к характеру разрушения, свойственному механизму, показанному на рис. 3, а и в. В тканых композиционных материалах изгибающая трещина может принимать более разветвленную форму [18].

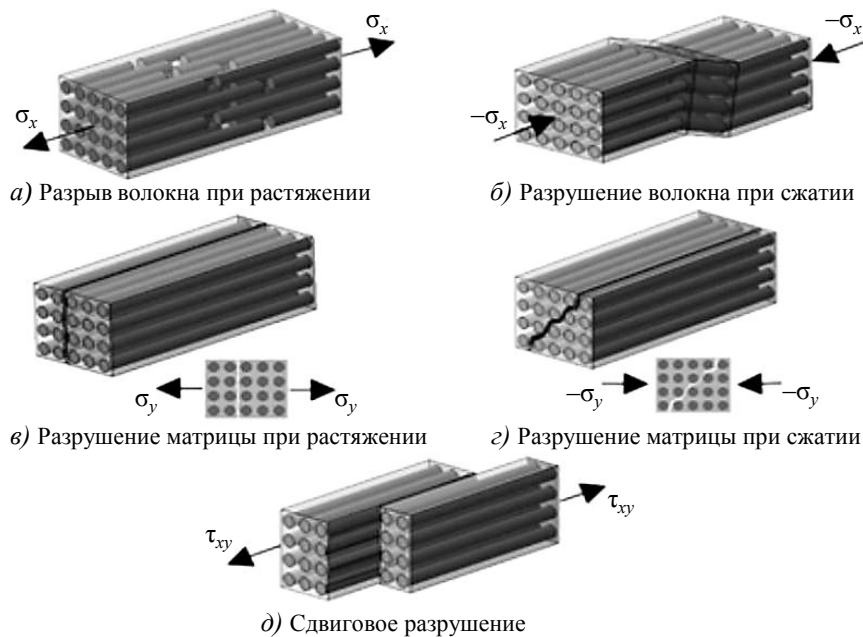


Рис. 3. Различные механизмы внутрислоевого разрушения углепластика [18]

Рост трещины

Дальнейший рост трещины происходит внутри слоя, в котором она зародилась, и зависит от коэффициента интенсивности напряжений K матрицы, который применяют для оценки интенсивности поля напряжений у вершины трещины. Эта величина полностью характеризует состояние вершины трещины в линейном упругом материале. Если предположить, что материал разрушается локально при некотором критическом сочетании напряжения и деформации, то из этого следует, что разрушение должно произойти при критическом значении интенсивности напряжения K_{1c} . Разрушение происходит, когда $K_1 \geq K_{1c}$. В этом случае коэффициент K_1 является движущей силой разрушения, а показатель K_{1c} – мерой сопротивления материала, которая независима от размера материала, но зависит от его природы [19]. Поэтому параметр K_{1c} называют вязкостью разрушения при плоском деформированном состоянии. Для материалов с малой вязкостью разрушения допускаются только трещины малой длины.

Поведение трещины при разрушении всегда сводится к двум вариантам. При хрупком разрушении трещина растет в одном направлении и быстро. Внешний вид даже без увеличения определяет гладкая поверхность излома. При вязком разрушении наблюдается значительная область пластической деформации в вершине трещины, а также частое деление трещин на более мелкие при движении дефекта вперед, при этом неизбежно тратится значительно больший уровень энергии, чем при хрупком разрушении.

Главным препятствием на пути роста трещины является волокно. В общей сложности для ПКМ любой природы существует четыре механизма поведения волокна (рис. 4).

Слабая адгезия между волокном и матрицей приводит к образованию перемычек волокна в полости, образованной ростом трещины. Разрушение по такому механизму происходит только в том случае, если пластичность волокна превышает пластичность самой матрицы, – например, термопластичное волокно в эпоксидной матрице [20] или композиционные материалы, армированные углеволокном, на основе керамической матрицы [18]. Более характерным видом разрушения для однонаправленных углепластиков является разрыв волокна, так как хрупкие волокна демонстрируют низкую способность к поглощению энергии из-за низкой деформации разрушения [21].

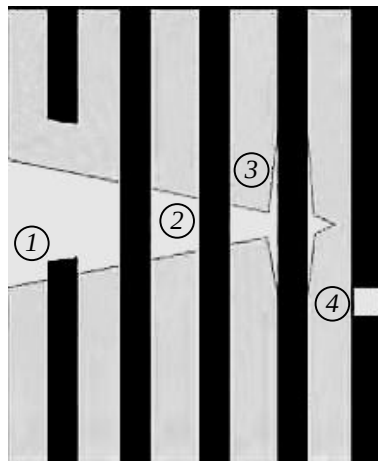


Рис. 4. Различные механизмы повреждения полимерных композиционных материалов внутри слоя в результате удара: 1 – вытяжение волокна; 2 – перемишка волокна; 3 – разрушение по межфазной границе; 4 – разрыв волокна [15]

Однако в тканых ПКМ переплетения нитей создают механическую связь между разрушаемыми областями, которая ограничивает распространение трещины. Данная структура способствует образованию перемишек нитей, которые могут выдерживать нагрузки даже после основной фазы разрушения и сохранять остаточную прочность материала. Кроме того, эффективность перемишек нитей зависит от их ориентации и типа переплетения. В некоторых случаях перемишки способны временно замедлить распространение трещины, но при высоких нагрузках они могут сами становиться точками концентрации напряжений, ускоряя процесс разрушения. Это объясняет, почему тканые углепластики демонстрируют более разветвленный и дискретный характер разрушения по сравнению с однонаправленными.

Таким образом, важным фактором, влияющим на последующий рост трещины, является перераспределение напряжений в зоне удара. В однонаправленных углепластиках разрушение развивается преимущественно вдоль волокон, что способствует формированию расслоений и пирамидальной структуры повреждений. В тканых ПКМ благодаря переплетению нитей напряжения перераспределяются более равномерно, снижая вероятность катастрофического разрушения. Это приводит к образованию сети микротрещин в матрице, а не к резкому развитию одной доминирующей трещины.

Расслоение

Потеря межслоевой связи представляет собой один из наиболее критичных типов повреждений углепластика, возникающих при воздействии ударных нагрузок. Формирование расслоений существенно влияет на остаточную прочность при испытаниях на сжатие материала, особенно при многократных нагрузках или эксплуатации в сложных условиях [22]. Характер развития расслоений различается в зависимости от структуры армирования: для однонаправленных углепластиков оно более выражено и развивается в глубину, тогда как для тканых углепластиков распространение расслоения ограничивается их структурой армирования.

Как правило, вязкость межслоевого разрушения для композиционных конструкций оценивается с точки зрения скорости высвобождения энергии деформации G [23]. В целом трещины можно рассматривать как комбинацию трех форм разрушения, показанных на рис. 5. Принято, что расслоение в композитах обычно происходит по *модам* I и II, а также по смешанному типу I+II. Исходя из этого, наиболее значимыми параметрами

прогнозирования расслоений являются G_I и G_{II} [23]. На данные характеристики влияет не только природа матрицы, но и структура армирования и угол между направлениями ориентации слоев.

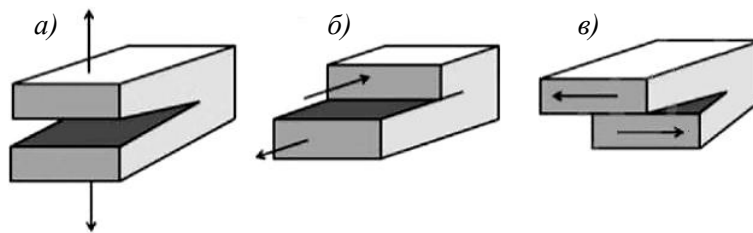


Рис. 5. Режимы разрушения по модам I (а), II (б) и III (в) [24]

В однонаправленных углепластиках основной причиной расслоения является распространение магистральной сдвиговой трещины, которая, проходя через толщу материала, приводит к расслоению. Данный процесс носит каскадный характер: после одного расслоения напряжение перераспределяется, что вызывает образование новых микротрещин в нижних слоях, ведущих к дальнейшему росту трещины и последующему расслоению. В результате этого механизма формируется пирамидальная зона повреждений, в которой трещины, образовавшиеся в толстом ПКМ, распространяются вниз от места удара, постепенно увеличивая площадь разрушения.

Для тканых углепластиков процесс расслоения отличается. Благодаря переплетению нитей и их механической связи между слоями материал демонстрирует большую устойчивость к межслоевому разрушению. В отличие от однонаправленных структур, где магистральная трещина распространяется беспрепятственно вдоль слоев, в тканых углепластиках трещина не может развиваться линейно и постоянно разделяется на множество более мелких трещин. Это приводит к дискретному характеру повреждений и ограничивает масштаб расслоения.

Таким образом, структура армирования имеет большое значение в формировании межслоевых расслоений. В однонаправленных углепластиках доминирует процесс каскадного расслоения с глубокой пирамидальной зоной повреждений, тогда как в тканых углепластиках расслоение более локализовано и ограничено благодаря механической связи между волокнами. Эти различия объясняют, почему тканые углепластики демонстрируют повышенную устойчивость к межслоевому разрушению и лучшую остаточную прочность после ударных нагрузок.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ уже более 10 лет изучается вопрос ударной прочности ПКМ. Для решения данной проблемы разработаны полимерные матрицы с повышенными деформативностью и ударопрочностью. Разрабатываемые материалы исследуют на стойкость к внешним ударным воздействиям и на трещиностойкость, в том числе в процессе циклических нагружений. Стойкость материала к ударным воздействиям оценивают по образованию механических повреждений при нанесении удара падающим грузом по стандарту ASTM D7136. Для оценки остаточных прочностных свойств материала образцы, подверженные ударному воздействию, проходят испытания на сжатие после удара по стандарту ASTM D7137.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ оснащен современным оборудованием с возможностью контроля множества параметров и получения детализированной информации на выходе. Оборудование позволяет проводить ударные испытания в температурном диапазоне от -60 до $+200$ °C. Универсальные испытательные машины позволяют проводить испытания в широком диапазоне температур – от -60 до $+350$ °C.

Влияние эксплуатационных условий

Ударопрочность и устойчивость к повреждениям углепластиков зависят от условий эксплуатации, например от температурного эффекта, термовлажностного старения, нагруженности конструкции и т. д. Эти факторы меняют общие механизмы разрушения и эксплуатационные характеристики композиционных конструкций, чем влияют на прочностные свойства ПКМ, особенно в случае нанесения удара. Поэтому важно изучить характеристики углепластиков вне лабораторных условий, прежде чем рассматривать их применение в качестве конструкционной детали. Небольшое количество статей, посвященных ударным испытаниям ПКМ на основе эпоксидных смол, армированных углеродным волокном, затрагивает условия окружающей среды, отличающиеся от лабораторных.

При кондиционировании образца при повышенной температуре (в области температуры стеклования) снимаются внутренние напряжения, образовавшиеся при отверждении композиционной матрицы. Вместе с тем повышение температуры приводит к ослаблению адгезии между волокном и матрицей внутри слоя. Низкие свойства межфазной зоны приводят к изменениям во взаимодействии волокна с растущей трещиной, так как большое количество энергии затрачивается на расслоение волокна от матрицы, тем самым замедляя рост трещины внутри слоя и снижая вероятность последующего расслоения.

В работе [25] исследовано, как удар при повышенной температуре влияет на механику повреждений углепластика и на его остаточную прочность при сжатии. Выбраны следующие температуры: 20, 50 и 80 °С. По мере роста температуры увеличивалась глубина погружения ударника и уменьшалась выпуклость повреждения с обратной стороны углепластика. Площадь расслоения при повышенной температуре также снижалась более чем в 1,5 раза, что закономерно повлияло и на рост остаточной прочности при сжатии.

Следует отметить, что при повышенной температуре механизм разрушения в верхних и нижних слоях также претерпевает изменения [26]. Так, повышение температуры снижает прочностные свойства матрицы при сжатии и сдвиге, визуализируется характерное увеличение глубины погружения индентора. Следствием данного эффекта является усиленная микропотеря устойчивости волокна в верхних слоях и его более частый излом, что в некоторых случаях заметно невооруженным глазом.

Понижение температуры, наоборот, усиливает адгезию волокна и матрицы и прочностные свойства матрицы, но вместе с тем вызывает возникновение внутренних напряжений из-за различия в коэффициентах теплового линейного расширения волокон и матрицы, что приводит к образованию микротрещин [27]. Зачастую в таких случаях наблюдается рост площади выпуклой зоны с противоположной удару стороны. Данные изменения связаны с температурной зависимостью скорости высвобождения энергии образования межслоевой трещины и аналогичной скорости при ее продвижении, значения которых повышаются в режимах разрушения I и II с ростом температуры, что способствует более вязкому разрушению матрицы [28].

Влияние термовлажностного старения также имеет большое значение, поскольку композиционные материалы в процессе эксплуатации часто подвергаются воздействию сред, в которых температура и влажность изменяются. Термовлажностное старение – процесс, в котором ухудшение механических характеристик и целостности композиционных материалов является результатом совместного воздействия влаги и температуры. Диффузия воды между цепями макромолекул вызывает расширение полимерной структуры из-за разделения макромолекул, что приводит к высвобождению межмолекулярных сил связи. Поэтому жесткость полимера уменьшается, и его

поведение становится более пластичным [29]. В углепластиках поглощение и диффузия влаги происходят в микротрещинах и на границе раздела «волокно–матрица», что влияет на адгезию. В результате длительного воздействия влаги зарегистрировано несколько изменений свойств: снижение температуры стеклования матрицы, молекулярной массы полимерной матрицы, рабочей температуры, прочности, жесткости и ударной вязкости материалов.

При длительном воздействии повышенной температуры матрица претерпевает окисление и термическую деструкцию, что делает ее более хрупкой. Несовпадения коэффициентами теплового линейного расширения волокон и матрицы в углепластиках с постепенным охрупчиванием матрицы приводят к разрушению на границе «волокно–матрица» и формированию большого количества микротрещин.

В работе [30] проведен эксперимент для сравнения остаточной прочности при сжатии образцов, состаренных в условиях повышенной температуры (термостарения) и повышенной температуры с высокой влажностью – термовлажностного старения. Общая площадь повреждений больше для образцов, подверженных термостарению.

В работе [31], связанной с термическим старением, сообщалось, что длительное старение (24 мес.) приводит к сильному охрупчиванию матрицы и трансформации морфологии повреждений вследствие удара. Образцы становятся более склонными к пробую, чем к расслоению, вследствие рассеивания энергии.

Заключения

В данной работе на основе разрозненных данных из научно-технической литературы рассмотрена последовательность процесса разрушения углепластиков при ударном воздействии. Такой системный подход позволяет глубже понять механизмы зарождения, роста трещин и расслоений, а также их зависимость от структуры материала и энергии удара.

Показано, что эксплуатационные условия (такие как температура и влажность) существенно изменяют ударную стойкость ПКМ. Однако стандартные испытания, проводимые в рамках общей квалификации (паспортизации) материалов, не учитывают эти факторы, что может приводить к недостаточной точности проектных расчетов.

Данную обзорную статью планируется использовать в качестве теоретической базы для постановки последующих экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния ударного воздействия при повышенных и пониженных температурах на остаточную прочность при сжатии.

Работа выполнена при поддержке 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»).

Список источников

1. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексашин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-349-367.

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: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 26.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
6. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // *Вестник Российской академии наук*. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
7. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М. Исследование возможности повышения стойкости к удару тонколистовых углепластиков за счет плакирования арамидным органопластиком // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 04. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
8. Вильдеман В.Э., Староверов О.А., Третьяков М.П. Деформирование и разрушение полимерных композиционных материалов в условиях предварительных циклических и низкоскоростных ударных воздействий // *Сб. тр. XXXI Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС–2019) (04–06 дек. 2019 г., г. Москва)*. М., 2020. С. 75–78.
9. Гуняева А.Г., Курносов А.О., Славин А.В. Опыт применения полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в двигательных установках для самолетов гражданского назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 06. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
10. Имамединов Э.Ш., Гуляев И.Н., Кондрашов С.В., Терехов И.В. Повышение ударной стойкости углепластиков на основе эпоксидной матрицы ВСЭ-1212 // *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. (19 нояб. 2021 г., г. Москва)*. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 97–113.
11. Васильчук Е.А., Гуляев И.Н., Яковлев Н.О., Мишкин С.И. Влияние скорости соударения на остаточную прочность углепластиков // *Труды ВИАМ*. 2024. № 9 (139). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-93-104.
12. Jefferson A.J., Srinivasan S.M., Arokiajan A., Nath D.H. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review // *Composite Structures*. 2019. Vol. 224. No. 3. Art. 111007.
13. Zheng D. Low velocity impact analysis of composite laminated plates: Doctor of Philosophy Dissertation. Akron, 2007. 143 p.
14. Tita V., de Carvalho J., Vandepitte D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches // *Composite Structures*. 2008. Vol. 83. No. 4. P. 413–428.
15. Nash N. Improving the performance of out-of-autoclave composite laminates using an interlaminar toughening technique: Doctor of Philosophy Dissertation. Limerick, 2016. 349 p.
16. Ramji A. Damage tolerance enhancement of thermoset composites modified with thermoplastic veil interleaves: Doctor of Philosophy Dissertation. Cranfield, 2019. 241 p.
17. Schultheisz C.R., Waas A.M. Compressive failure of composites, part I: Testing and micromechanical theories // *Progress in Aerospace Sciences*. 1996. Vol. 32. No. 1. P. 1–42.
18. Shah S.Z.H., Karuppanan S., Megat-Yusoff P.S.M., Sajid Z. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A Review // *Composite Structures*. 2019. Vol. 217. P. 100–121.
19. Anderson T.L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. Fourth edition. Boca Raton: CRC Press, 2017. 684 p. DOI: 10.1201/9781315370293.

20. Quan D., Alderliesten R., Dransfeld C. et al. Enhancing the fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites by interleaving hybrid meltable/non-meltable thermoplastic veils // *Composite Structures*. 2020. Vol. 252. Art. 112699.
21. Yang B., Chen Y., Lee J. et al. In-plane compression response of woven CFRP composite after low-velocity impact: Modelling and experiment // *Thin-Walled Structures*. 2021. Vol. 158. P. 107186.
22. Sun X.C., Hallett S.R. Failure mechanisms and damage evolution of laminated composites under compression after impact (CAI): Experimental and numerical study // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 104. P. 41–59.
23. Jung K.-H., Kim D.-H., Kim H.-J. et al. Finite element analysis of a low-velocity impact test for glass fiber-reinforced polypropylene composites considering mixed-mode interlaminar fracture toughness // *Composite Structures*. 2017. Vol. 160. P. 446–456.
24. Boon Y.D., Joshi S.C. A review of methods for improving interlaminar interfaces and fracture toughness of laminated composites // *Materials Today Communications*. 2020. Vol. 22. P. 100830.
25. Körbelin J., Derra M., Fiedler B. Influence of temperature and impact energy on low velocity impact damage severity in CFRP // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 115. P. 76–87.
26. Körbelin J., Dreiner C., Fiedler B. Impact of temperature on LVI-damage and tensile and compressive residual strength of CFRP // *Composites Part C: Open Access*. 2020. Vol. 3. P. 100074.
27. Старцев В.О. Старение полимерных композиционных материалов в морской воде (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.03.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
28. Benli S., Sayman O. The Effects of Temperature and Thermal Stresses on Impact Damage in Laminated Composites // *Mathematical and Computational Applications*. 2011. Vol. 16. No. 2. P. 392–403.
29. Fernandes O., Dutta J., Pai Y. Effect of various factors and hygrothermal ageing environment on the low velocity impact response of fibre reinforced polymer composites: A comprehensive review // *Cogent Engineering*. 2023. Vol. 10. No. 1. DOI: 10.1080/23311916.2023.2247228.
30. Ma S., He Y., Hui L., Xu L. Effects of hygrothermal and thermal aging on the low-velocity impact properties of carbon fiber composites // *Advanced Composite Materials*. 2019. Vol. 29. P. 1–18.
31. Berkettis K., Tzetzis D., Hogg P.J. The influence of long term water immersion ageing on impact damage behaviour and residual compression strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP) // *Materials & Design*. 2008. Vol. 29. No. 7. P. 1300–1310.

References

1. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmelniyskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 26, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
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: February 26, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Slavin A.V., Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

6. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916. DOI: 10.31857/S0869587323100055.
7. Zhelezina G.F., Solovieva N.A., Kulagina G.S., Shuldeshova P.M. Study of the possibility of increasing the impact resistance of thin-sheeted carbon fiber-reinforced plastics due to cladding with aramid organoplastics. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
8. Vildeman V.E., Staroverov O.A., Tretyakov M.P. Deformation and fracture of polymer composite materials under preliminary cyclic and low-speed impact effects. *Reports XXXI Int. Innovation Conf. of Young Scientists and Students on Mechanical Engineering Problems* (December 4–6, 2019, Moscow). Moscow, 2020, pp. 75–78.
9. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Slavin A.V. Experience in the use of polymer composite materials developed by NRC «Kurchatov Institute» – VIAM in engines for civil aircraft. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-82-94.
10. Imametdinov E.Sh., Gulyaev I.N., Kondrashov S.V., Terekhov I.V. Increasing the impact resistance of carbon fiber reinforced plastics based on the VSE-1212 epoxy matrix. *Polymer composite materials and production technologies of the new generation: Proc. of the V All-Rus. sc. and tech. conf.* (November 19, 2021, Moscow). Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, pp. 97–113.
11. Vasilchuk E.A., Gylyaev I.N., Yakovlev N.O., Mishkin S.I. Influence of collision speed on the residual durability of CFRP. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-93-104.
12. Jefferson A.J., Srinivasan S.M., Arokiarajan A., Nath D.H. Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. *Composite Structures*, 2019, vol. 224, no. 3, art. 111007.
13. Zheng D. *Low velocity impact analysis of composite laminated plates*: Doctor of Philosophy Dissertation. Akron, 2007, 143 p.
14. Tita V., de Carvalho J., Vandepitte D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches. *Composite Structures*, 2008, vol. 83, no. 4, pp. 413–428.
15. Nash N. *Improving the performance of out-of-autoclave composite laminates using an interlaminar toughening technique*: Doctor of Philosophy Dissertation. Limerick, 2016, 349 p.
16. Ramji A. *Damage tolerance enhancement of thermoset composites modified with thermoplastic veil interleaves*: Doctor of Philosophy Dissertation. Cranfield, 2019, 241 p.
17. Schultheisz C.R., Waas A.M. Compressive failure of composites, part I: Testing and micromechanical theories. *Progress in Aerospace Sciences*, 1996, vol. 32, no. 1, pp. 1–42.
18. Shah S.Z.H., Karuppanan S., Megat-Yusoff P.S.M., Sajid Z. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A Review. *Composite Structures*, 2019, vol. 217, pp. 100–121.
19. Anderson T.L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Fourth edition. Boca Raton: CRC Press, 2017, 684 p. DOI: 10.1201/9781315370293.
20. Quan D., Alderliesten R., Dransfeld C. et al. Enhancing the fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites by interleaving hybrid meltable/non-meltable thermoplastic veils. *Composite Structures*, 2020, vol. 252, art. 112699.
21. Yang B., Chen Y., Lee J. et al. In-plane compression response of woven CFRP composite after low-velocity impact: Modelling and experiment. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 158, p. 107186.
22. Sun X.C., Hallett S.R. Failure mechanisms and damage evolution of laminated composites under compression after impact (CAI): Experimental and numerical study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 104, pp. 41–59.

23. Jung K.-H., Kim D.-H., Kim H.-J. et al. Finite element analysis of a low-velocity impact test for glass fiber-reinforced polypropylene composites considering mixed-mode interlaminar fracture toughness. *Composite Structures*, 2017, vol. 160, pp. 446–456.
24. Boon Y.D., Joshi S.C. A review of methods for improving interlaminar interfaces and fracture toughness of laminated composites. *Materials Today Communications*, 2020, vol. 22, p. 100830.
25. Körbelin J., Derra M., Fiedler B. Influence of temperature and impact energy on low velocity impact damage severity in CFRP. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 115, pp. 76–87.
26. Körbelin J., Dreiner C., Fiedler B. Impact of temperature on LVI-damage and tensile and compressive residual strength of CFRP. *Composites Part C: Open Access*, 2020, vol. 3, p. 100074.
27. Startsev V.O. The degradation of polymer composite materials in seawater (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 11, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-148-170.
28. Benli S., Sayman O. The Effects of Temperature and Thermal Stresses on Impact Damage in Laminated Composites. *Mathematical and Computational Applications*, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 392–403.
29. Fernandes O., Dutta J., Pai Y. Effect of various factors and hygrothermal ageing environment on the low velocity impact response of fibre reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Cogent Engineering*, 2023, vol. 10, no. 1. DOI: 10.1080/23311916.2023.2247228.
30. Ma S., He Y., Hui L., Xu L. Effects of hygrothermal and thermal aging on the low-velocity impact properties of carbon fiber composites. *Advanced Composite Materials*, 2019, vol. 29, pp. 1–18.
31. Berketis K., Tzetzis D., Hogg P.J. The influence of long term water immersion ageing on impact damage behaviour and residual compression strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP). *Materials & Design*, 2008, vol. 29, no. 7, pp. 1300–1310.

Информация об авторах

Иванов Дмитрий Денисович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Губин Антон Михайлович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry D. Ivanov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anton M. Gubin, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2025.
The article was submitted 24.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2025.

Научная статья

УДК 620.1:666.193.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ
В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО ТЕПЛОГО И ОЧЕНЬ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА
ПОСЛЕ 10 ЛЕТ ЭКСПОЗИЦИИ НА ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДКАХ***П.С. Мараховский¹, А.А. Кычкин², Н.С. Скуридина¹, А.К. Кычкин³, А.А. Габышев²*

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

²Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия; prezidium@prez.ysn.ru

³Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Показано влияние факторов умеренно теплого и очень холодного климата на физико-механические свойства базальтопластиковой арматуры. Температура стеклования после 10 лет экспозиции в очень холодном климате уменьшается на 1 °С, а в умеренно теплом климате – на 3–6 °С в сравнении с исходным состоянием. Экстремальные климатические условия оказывают более агрессивное воздействие на композиционную арматуру с увеличением диаметра от 6 до 8 мм, чем условия Геленджика, в силу возрастания упругих напряжений в объеме материала. Наблюдается значительное снижение прочности при растяжении (на 15,4 %) и сжатии (на 14,9 %) в условиях Якутска после экспозиции на открытой площадке в течение 10 лет.

Ключевые слова: старение, температурный коэффициент линейного расширения, температура стеклования, базальтопластиковая арматура, прочность при растяжении

Для цитирования: Мараховский П.С., Кычкин А.А., Скуридина Н.С., Кычкин А.К., Габышев А.А. Исследование старения базальтопластиковой арматуры в условиях умеренно теплого и очень холодного климата после 10 лет экспозиции на открытых площадках // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114.

Scientific article

**BASALT-PLASTIC ROD AGING INVESTIGATION
IN MODERATELY WARM AND VERY COLD CLIMATES
AFTER 10 YEARS OF EXPOSURE IN OPEN AREAS***P.S. Marakhovskiy¹, A.A. Kychkin², N.S. Skuridina¹, A.K. Kychkin³, A.A. Gabyshev²*

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

²Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science», Yakutsk, Russia; prezidium@prez.ysn.ru

³Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science» V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. The article shows the influence of the factors of a moderately warm and very cold climates on the physical and mechanical properties of the material. The glass transition temperature decreases by 1 °C after 10 years of exposure in a very cold climate, and decreases by 3–6 °C in a moderately warm climate, compared to the initial state. Extreme climatic conditions have a more aggressive effect on composite reinforcement with an increase in diameter from 6 to 8 mm than in Gelendzhik, due to an increase in elastic stresses in the volume of the material. There is a significant decrease in the strength of σ_t by 15,4 %, σ_c by 14,9 % in Yakutsk conditions after exposure in an open area for 10 years.

Keywords: aging, temperature coefficient of linear expansion, glass transition temperature, basalt reinforcement, tensile strength

For citation: Marakhovskiy P.S., Kychkin A.A., Skuridina N.S., Kychkin A.K., Gabyshev A.A. Basalt-plastic rod aging investigation in moderately warm and very cold climates after 10 years of exposure in open areas. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) подвержены старению при эксплуатации в различных климатических зонах. Конструкции из ПКМ нашли применение в авиационной промышленности, строительстве, машиностроении, но для обеспечения безопасной эксплуатации необходимо выработать требования к их надежности [1, 2].

Важным показателем надежности является сохраняемость свойств материала. Поскольку ПКМ применяют в различных отраслях, необходимо учитывать изменение характеристик в различных климатических районах. Для большей части РФ выделяют холодные и умеренные макроклиматические районы [3].

Ухудшение механических показателей ПКМ после экспозиции на открытых стендах в умеренно холодном, холодном и очень холодном климате соизмеримо или даже более значительно, чем после пребывания в теплых и влажных регионах. Наибольшее воздействие на ПКМ оказывают внешние факторы в очень холодном климате (Якутск) в сравнении с умеренно теплым климатом (Геленджик). Снижение прочности после 5 лет экспозиции угле-, стекло- и органопластиков на 10–15 % больше, чем после аналогичного экспонирования в более теплых регионах (Москва, Геленджик, Сочи, Батуми) в силу достижения экстремально низких температур [4]. Такое изменение связано с воздействием воды, проникающей в объем матрицы из воздушной среды и замерзающей в условиях ограниченного объема внутри полимерной цепи при температурах ниже –30 °C. При размере капли 150 нм она замерзает при –10 °C, 20 нм – при –20 °C, 5 нм – при –36 °C, 2 нм – при –41 °C [5, 6]. Основным типом надмолекулярной структуры аморфных полимеров являются глобулярные образования, типичные как для линейных, так и для сшитых полимеров. Размер структурной составляющей варьируется от 10 до 100 нм. Таким образом, для полимеров, представляющих собой одну макромолекулу, нижняя точка замерзания воды будет составлять приблизительно –22 °C [7]. В Якутске переходы через температуру –22 °C происходят ~(10–12) раз в год. При образовании льда макромолекула увеличивается в объеме, что способствует зарождению дополнительных напряжений, приводящих к растрескиванию матрицы в глубине изделия [8].

Для других регионов РФ такие низкие температуры не характерны, возможны частые переходы через температуру 0 °C. В случае зарождения на поверхности микротрещин проникающая вглубь вода воздействует на верхний слой материала [9]. Дефекты могут возникать за счет влияния ультрафиолета и механического воздействия. Частицы пыли и песка оказывают истирающее действие на поверхность ПКМ: происходят потеря блеска, механическое вымеливание пигментов и эрозия покрытия [10, 11].

На начальной стадии экспозиции на открытых площадках в материале происходят процессы доотверждения и структурной релаксации за счет перегрева вследствие солнечного излучения. За счет интегральной степени черноты, близкой к 1, практически

вся энергия излучения Солнца, поглощаемая углепластиком, расходуется на увеличение температуры образца. В дни высокой солнечной радиации его температура может превышать температуру окружающего воздуха на 20–40 °С [12, 13]. Повышение температуры образца ускоряет протекание физико-химических процессов как старения (фото- и термоокислительной деструкции), так и структурообразования.

В настоящее время в связи с активным освоением арктических регионов повышенное внимание исследователей привлечено к проблеме старения ПКМ в холодном климате.

Цель работы – установление зависимости изменения физико-механических свойств базальтопластиковой арматуры (БПА) при экспозиции в течение 5 и 10 лет на открытых площадках в условиях умеренно теплого и очень холодного климата.

Материалы и методы

Для проведения исследований отобраны образцы из промышленной партии БПА, представляющие собой однонаправленные стержни с кольцевым армированием диаметрами 6, 8 и 10 мм, изготовленные на технологической линии Бийского завода стеклопластиков на основе базальтового ровинга РБН 13-2400-4С производства ООО «ТБМ» (Якутск) согласно ТУ 2296-001-86166796–2013. Линия предназначена для изготовления арматурного стержня волнового периодического профиля методом продольно-поперечной намотки из однонаправленных волокнистых материалов, пропитанных полимерным связующим на основе термореактивных эпоксидно-диановых смол. Исходное связующее, основу которого составляет эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отверждаемая изометилтетрагидрофталевым ангидридом (изо-МТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-трис(диметиламинометил)фенола (УП-606/2), готовили по рецептуре, согласно РТП-КП-2296-001-86166796–2012, и формовали по режиму с максимальной температурой отверждения 150 °С [14–22].

Для испытания методом динамического механического анализа образцов БПА диаметрами 6, 8 и 10 мм в исходном состоянии и после экспозиции на открытых площадках применен держатель для трехточечного изгиба с расстоянием между опорами 40 мм и шириной индентора 12 мм. Испытания проведены в среде аргона (расход газа 43 мл/мин) в диапазоне температур от 25 до 250 °С, со скоростью нагрева 5 °С/мин, с частотой 1 Гц и амплитудой деформации 10 мкм. Для исключения влияния измененного приповерхностного слоя на физические свойства вырезаны образцы из центра БПА размером 4×5×45 мм.

Для анализа температурного коэффициента линейного расширения α использованы образцы размером 4×4×20 мм. Измерения проведены в среде гелия (расход газа 70 мл/мин), проходящего через измерительную ячейку термомеханического анализатора, скорость нагрева составила 5 °С/мин.

Прочность при растяжении определяли на испытательной машине на базе ЦКП ИФТПС СО РАН. Скорость перемещения траверсы составила 5 мм/мин. Согласно ГОСТ 32492–2015, для определения прочностных характеристик использовали образцы общей длиной 625±2 мм из-за ограничений величины захвата испытательной машины. Длина рабочего участка составила 320±2 мм, длина испытательной муфты: 150±2 мм с каждой стороны. Методика испытаний допускает использование более коротких испытательных муфт, если разрыв образца происходит в пределах длины рабочего участка без проскальзывания и разрушения в них. Длина базы измерения, по центру которой размещен экстензометр, составила 50±2 мм. Для определения прочности при сжатии, согласно ГОСТ 32492–2015, применены образцы длиной 176±2 мм.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0036 и FWRS-2024-0058 с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Результаты и обсуждение

На рис. 1–3 представлены фотографии БПА в исходном состоянии, после 5 и 10 лет экспозиции в условиях открытых площадок климатических станций в Якутске и Геленджике.

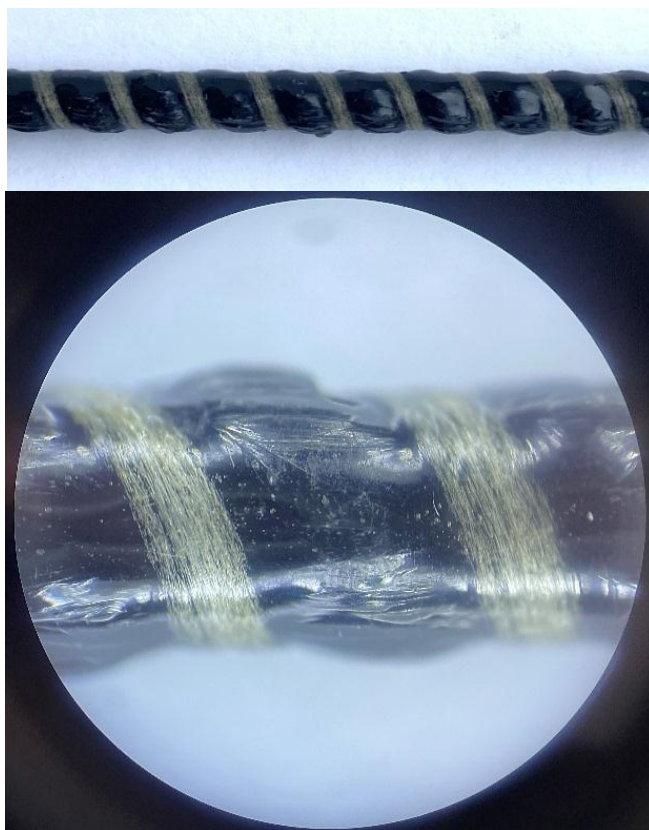


Рис. 1. Образец базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм в исходном состоянии

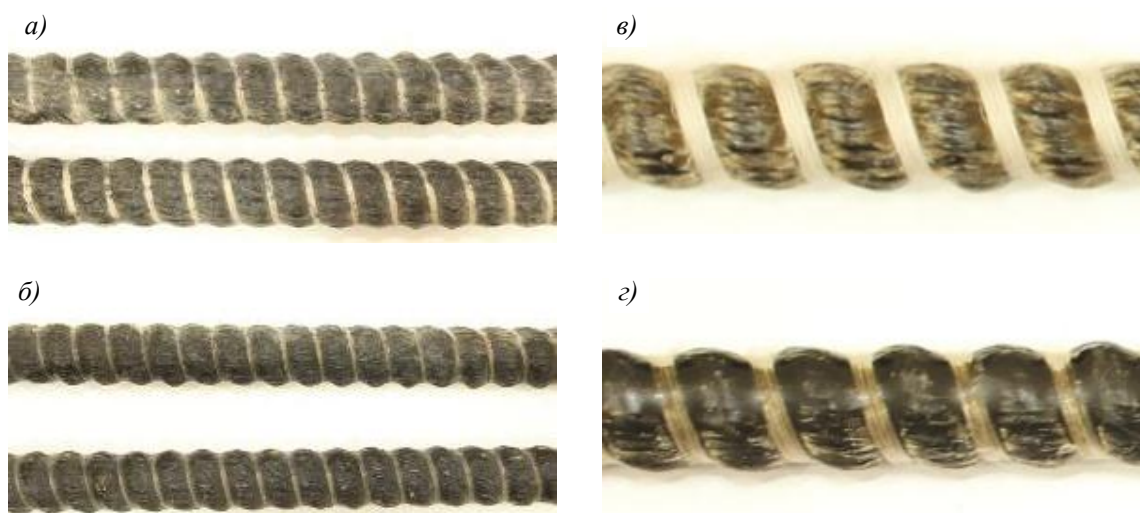


Рис. 2. Образцы базальтопластиковой арматуры диаметром 10 мм после 5 лет экспозиции на открытой площадке в Якутске (а, б) и Геленджике (в, г) с солнечной (а, в) и теневой (б, г) сторон

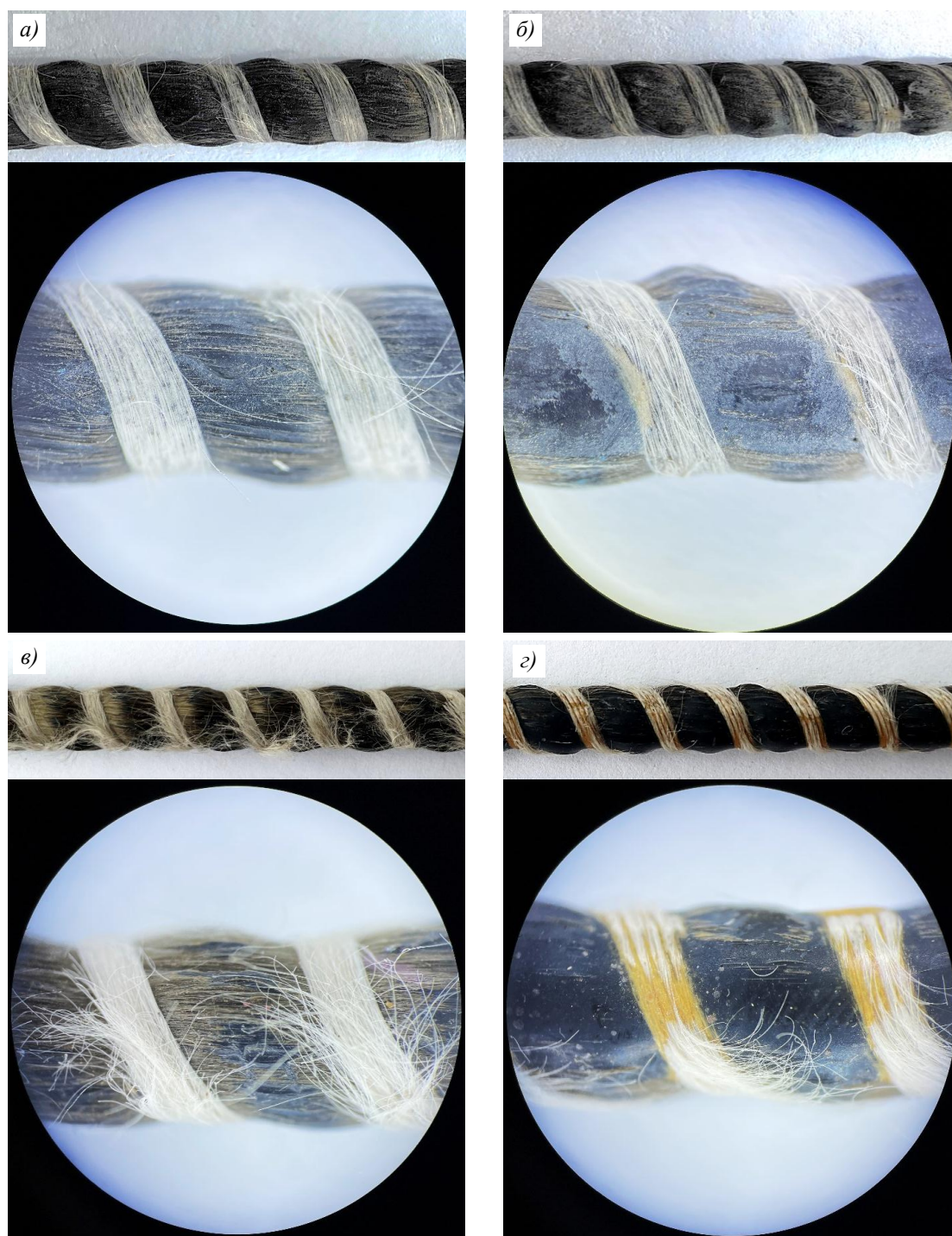


Рис. 3. Образцы базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм после 10 лет экспозиции на открытой площадке в Якутске (а, б) и Геленджике (в, з) с солнечной (а, в) и теневой (б, з) сторон

При визуальном осмотре у образцов БПА после 5 лет экспозиции на открытой площадке в Геленджике с солнечной стороны обнаружены потеря блеска, осветление, обрывы светлой оплеточной нити (рис. 2, з) и полное оголение волокон, с теневой стороны – осветление и частичное оголение волокон. Аналогичные изменения характерны и для образцов, размещенных на климатической станции в Якутске. После 10 лет экспозиции в Якутске на образцах с солнечной стороны наблюдаются осветление, износ

поверхности, потеря блеска и полимерной матрицы, что приводит к оголению армирующего наполнителя. С теневой стороны процесс деградации происходит медленнее, но также зафиксированы осветление и частичное оголение волокон, что свидетельствует о влиянии не только ультрафиолетового излучения, но и других факторов. Присутствуют также остатки полимерной матрицы на обмоточной нити (рис. 3, б), что подтверждает неравномерную деградацию с теневой стороны. На образцах обнаружены участки, менее подверженные ультрафиолетовому излучению, ветровой или дождевой эрозии с наиболее защищенной стороны из-за особенностей формы образца арматуры. На образцах после 10 лет экспонирования на открытой площадке в Геленджике с солнечной стороны также наблюдаются осветление, износ поверхности, потеря блеска и полимерной матрицы, что приводит к оголению армирующего волокна. С теневой стороны зафиксированы сохранение полимерной поверхности арматуры и значительное усыхание на обмоточной нити материала. Распушивание обмоточной нити связано с воздействием высокой влажности, что приводит к набуханию полимерной матрицы в зимне-весенний период и последующей десорбции в летний сезон (рис. 3, в).

Чувствительными методами термического анализа [15] исследованы температурный коэффициент линейного расширения и температура стеклования T_g БПА в исходном состоянии, после 5 и 10 лет климатического старения на открытых стендах в умеренно теплом климате Геленджика и очень холодном климате Якутска.

Методом динамического механического анализа для БПА в исходном состоянии выявлен двойной переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние: α_1 -переход при 140 °С и α_2 -переход при 170 °С. После климатического воздействия в течение 5 лет в Якутске обнаружено смещение α_1 -перехода к низким температурам, а α_2 -перехода – к более высоким. Причинами изменения температур переходов являются ослабление внутримолекулярного взаимодействия и доотверждение эпоксидной матрицы, сопровождающееся повышением температуры стеклования на 2–4 °С, увеличением соотношения E'_{175}/E'_{25} и уменьшением доли свободного объема на 4 %. Соотношение доли физико-химических и химических сшивок можно определить по формуле

$$\frac{v_{\text{фх}}}{v_x} = \frac{E'_{25}}{E'_{175}} - 1,$$

где E'_{25} и E'_{175} – динамический модуль упругости в высокоэластическом и стеклообразном состояниях; $v_{\text{фх}}/v_x$ – соотношение количества узлов физико-химических и химических сшивок [23, 24].

Результаты испытаний образцов, размещенных на различных климатических площадках, приведены в табл. 1 и на рис. 4–8.

На начальном этапе экспозиции в образцах накоплены значительные напряжения, о чем свидетельствует соотношение минимального и максимального значений динамического модуля упругости при 30 °С, составляющее 1,2. После 5 лет размещения в Якутске накопление напряжений приводит к увеличению данного показателя до 1,9, а в Геленджике релаксация напряжений служит причиной снижения соотношения до 1,1. Увеличение продолжительности экспозиции в 2 раза характеризуется снижением данного соотношения как в Геленджике (до 1,08), так и в Якутске (до 1,47). Максимальные значения динамического модуля упругости образцов БПА достигаются после 5 лет экспонирования в Геленджике и после 10 лет в Якутске. При этом температура стеклования после 10 лет экспозиции в условиях очень холодного климата снижается на 1 °С, а в умеренно теплом климате – на 3–6 °С в сравнении со значениями для образцов в исходном состоянии.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6, 8 и 10 мм в исходном состоянии, после 5 и 10 лет экспозиции в Якутске и Геленджике

Показатель	Значение показателя для образца диаметром, мм					
	6	8	10	6	8	10
	Якутск			Геленджик		
Исходное состояние						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	127	130	130	127	130	130
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости E' , °C	138	140	142	138	140	142
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	198	182	181	198	182	181
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$, °C	143	144	147	143	144	147
Пик на кривой модуля потерь E'' , °C	142	137	142	142	137	142
E'_{175}/E'_{25}	0,56	0,32	0,24	0,56	0,32	0,24
α_{175}	12,7	13,5	13,2	12,7	13,5	13,2
α_{50}	11,6	12,2	12,4	11,6	12,2	12,4
$v_{\text{фх}}/v_x$	0,78	2,16	3,10	0,78	2,16	3,10
5 лет экспозиции						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	127	128	128	122	128	121
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости E' , °C	142	141	140	143	143	136
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	182	175	180	197	187	185
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$, °C	149	149	147	147	146	141
Пик на кривой модуля потерь E'' , °C	139	139	138	143	142	136
E'_{175}/E'_{25}	0,51	0,32	0,29	0,53	0,35	0,28
α_{175}	7,20	7,57	6,73	5,55	7,05	7,35
α_{50}	6,35	7,02	6,42	6,25	6,86	6,82
$v_{\text{фх}}/v_x$	0,98	2,10	2,46	0,89	1,84	2,64
10 лет экспозиции						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	125	125	126	120	119	126
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости E' , °C	137	139	141	135	134	137
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости E' , °C	193	189	198	186	180	181
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$, °C	139	141	143	138	138	140
Пик на кривой модуля потерь E'' , °C	136	138	140	133	134	130
E'_{175}/E'_{25}	0,62	0,40	0,42	0,22	0,17	0,20
α_{175}	6,12	6,79	7,20	7,41	6,70	6,44
α_{50}	6,22	6,58	6,81	6,64	6,88	7,14
$v_{\text{фх}}/v_x$	0,61	1,49	1,39	3,63	4,92	4,21
Примечание. E'_{175}/E'_{25} – соотношение динамических модулей упругости в высокоэластическом и стеклообразном состояниях, α_{175} и α_{50} – температурные коэффициенты линейного расширения при температурах 175 и 50 °C соответственно, $v_{\text{фх}}/v_x$ – соотношение количества узлов физико-химических и химических сшивок.						

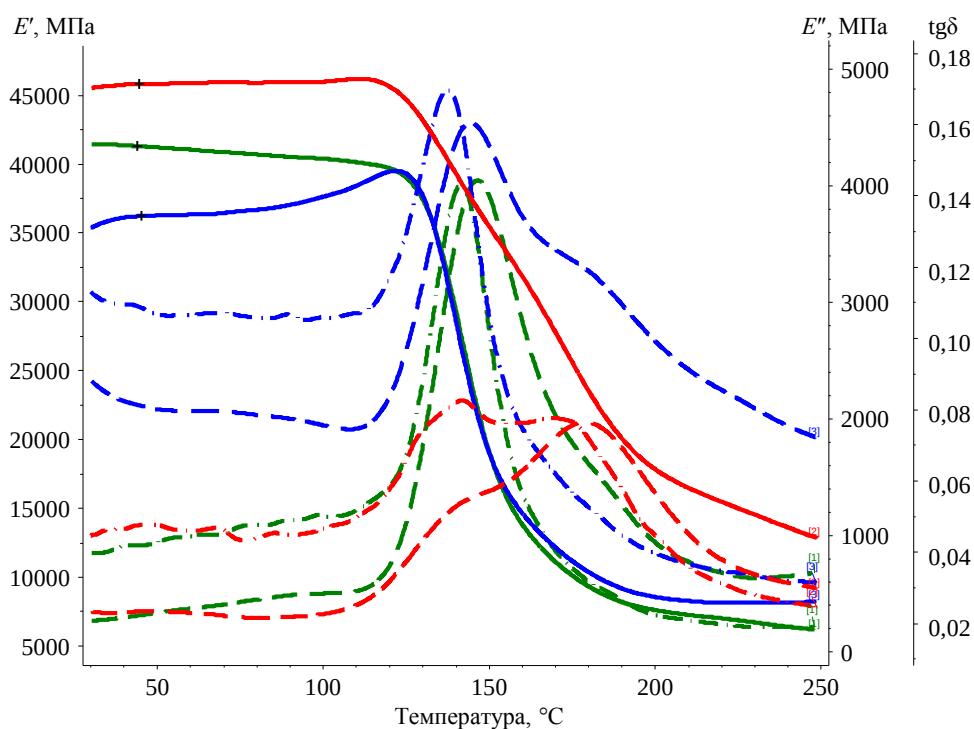


Рис. 4. Температурные зависимости динамического модуля упругости E' (—), модуля потерь E'' (-·-) и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (---) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) в исходном состоянии

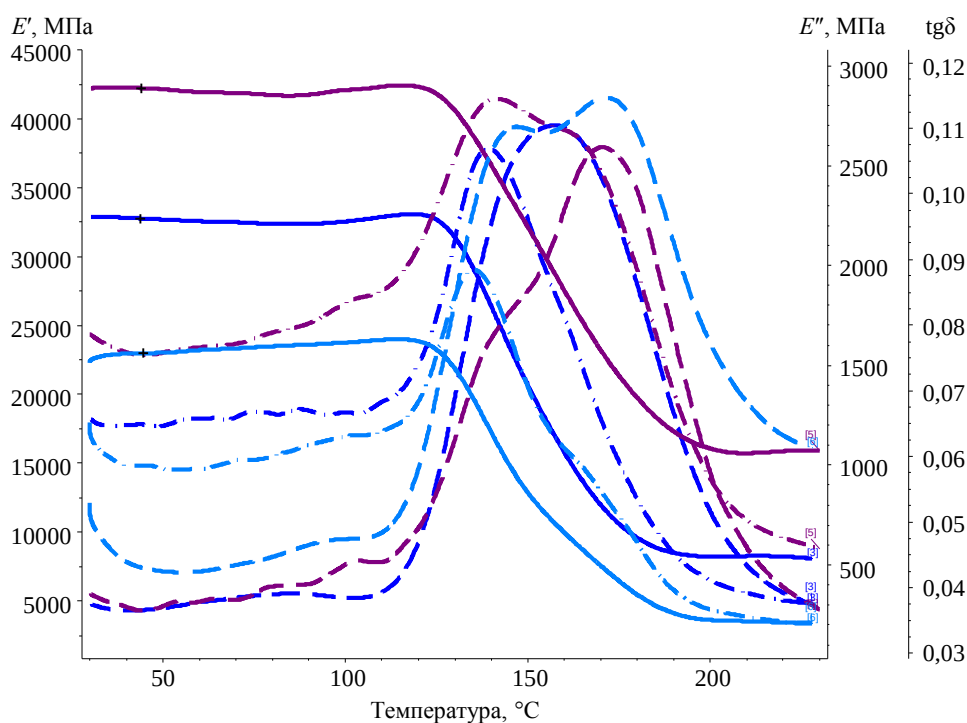


Рис. 5. Температурные зависимости динамического модуля упругости E' (—), модуля потерь E'' (-·-) и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (---) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 5 лет экспозиции в Якутске

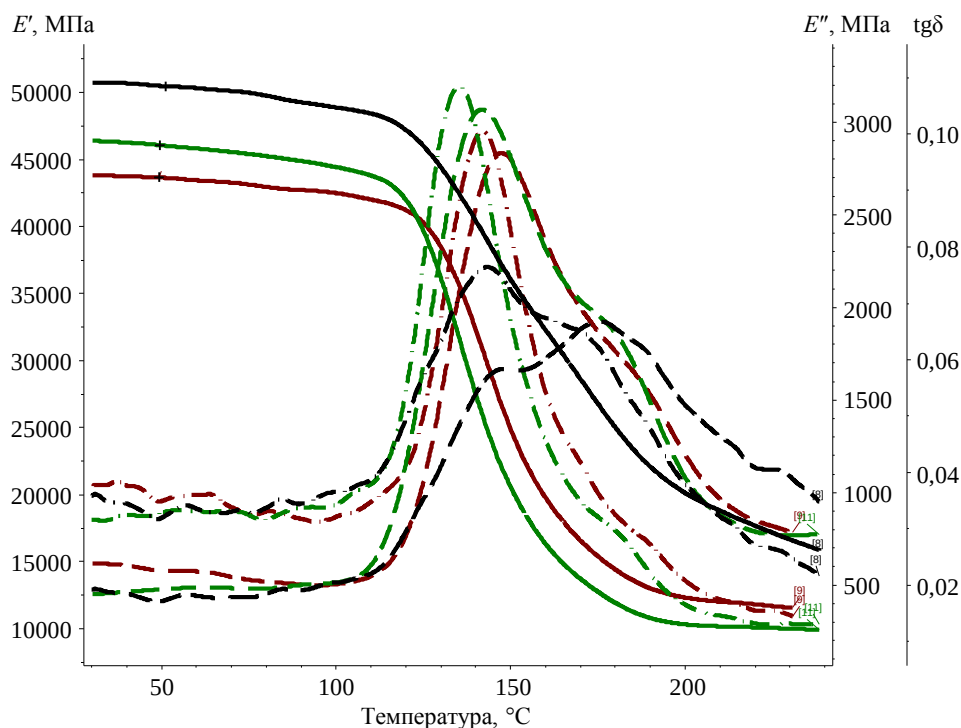


Рис. 6. Температурные зависимости динамического модуля упругости E' (—), модуля потерь E'' (-·-) и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 5 лет экспозиции в Геленджике

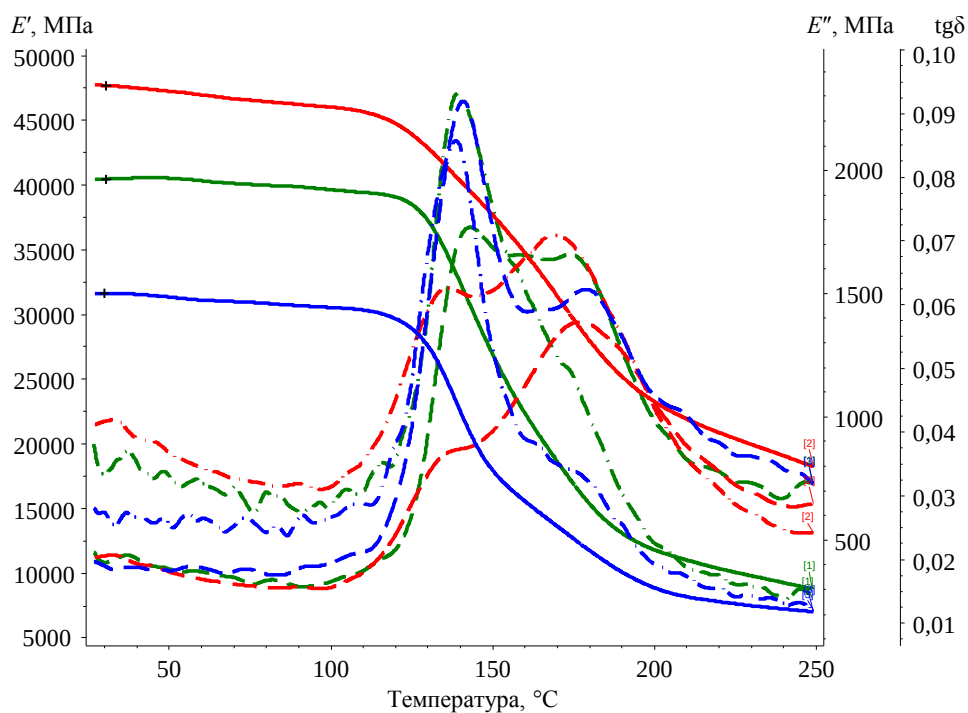


Рис. 7. Температурные зависимости динамического модуля упругости E' (—), модуля потерь E'' (-·-) и тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 10 лет экспозиции в Якутске

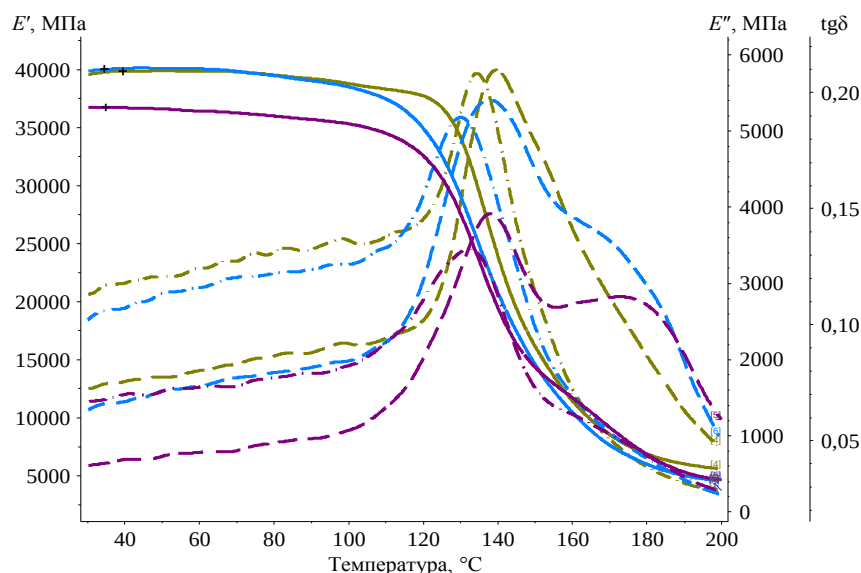


Рис. 8. Температурные зависимости динамического модуля упругости E' (—), модуля потерь E'' (---) и тангенса угла механических потерь $\operatorname{tg}\delta$ (---) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 10 лет экспозиции в Геленджике

Соотношение количества физических и химических узлов определяет условие распределения внешней нагрузки в БПА. Если доля физических узлов большая, то обеспечивается равномерное распределение нагрузки. Наибольшей пластичностью обладает арматура диаметром 10 мм, однако с увеличением продолжительности экспозиции в условиях очень холодного климата доля химических сшивок повышается, что снижает подвижность узлов в полимере. Наименьшей способностью к деформации обладает реактопласт в арматуре диаметром 6 мм. Следует отметить снижение доли поперечных сшивок для всех изделий различных типоразмеров, размещенных в Геленджике, так как соотношение E'_{175}/E'_{25} уменьшается до 60 %, что свидетельствует о деградации материала. Данный показатель в Якутске возрастает до 75 %, что свидетельствует об увеличении плотности химических связей.

В табл. 2 и 3 представлены результаты сравнительных исследований прочностных свойств БПА диаметрами 6 и 8 мм в умеренно теплом и очень холодном климате.

Таблица 2

Влияние экспонирования в умеренно теплом и очень холодном климате на прочностные показатели базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм [25, 26]

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, мес.	Показатель	Значение показателя, МПа	Изменение показателя, %
В исходном состоянии	—	σ_t	1120	—
		σ_b	1023	
		σ_c	410	
Геленджик	30	σ_b	1094	+6,9
		σ_c	427	+4,2
Якутск	28	σ_t	1206	+7,7
		σ_b	1215	+18,8
		σ_c	428	+4,3
Геленджик	54	σ_b	1193	+16,6
Якутск	51	σ_t	1275	+13,8
		σ_b	1220	+19,3
Геленджик	120	σ_t	1036	−7,4
		σ_c	440	+7,3
Якутск	120	σ_t	1040	−7,1
		σ_c	416	+1,5

Примечание. σ_t , σ_c , σ_b – пределы прочности при растяжении, сжатии и изгибе.

Таблица 3

**Влияние экспонирования в умеренно теплом и очень холодном климате
на прочностные показатели базальтопластиковой арматуры диаметром 8 мм [25, 26]**

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, мес.	Показатель	Значение показателя, МПа	Изменение показателя, %
В исходном состоянии	–	σ_t	1003	–
		σ_c	466	
Геленджик	54	σ_t	1029	+2,6
Якутск	51	σ_t	1081	+7,7
		σ_c	485	+4,1
Геленджик	120	σ_t	933	–7,0
		σ_c	423	–9,3
Якутск	120	σ_t	849	–15,4
		σ_c	397	–14,9
Примечание. σ_t , σ_c – пределы прочности при растяжении и сжатии.				

Экстремальные климатические условия (низкие температуры, высокая влажность, циклы «замораживание–оттаивание») в течение 10 лет экспозиции оказывают более агрессивное воздействие на композиционную арматуру с увеличением ее диаметра, чем условия умеренно теплого климата, в силу возрастания упругих напряжений в объеме материала [27]. Наблюдается значительное снижение пределов прочности при растяжении (на 15,4 %) и сжатии (на 14,9 %) на открытой площадке в условиях Якутска.

С увеличением толщины изделия возникают большие градиенты температур при одних и тех же условиях окружающей среды, в связи с чем в БПА возникают микротрещины из-за циклических температурных нагрузок и повышенной концентрации напряжений в материале, что способствует его деградации.

Заключения

Показано влияние факторов умеренно теплого и очень холодного климата на физико-механические свойства материала. Температура стеклования после 10 лет экспозиции в Якутске уменьшается на 1 °С, а в Геленджике – на 3–6 °С в сравнении с исходным состоянием. При этом плотность сшивок увеличивается до 75 % для образцов, размещенных в условиях очень холодного климата, и снижается до 60 % для образцов, экспонированных в умеренно теплом климате, за один и тот же период. Прочностные показатели БПА диаметром 8 мм уменьшаются на 15,4 %, а для изделия диаметром 6 мм – на 7,1 %.

Список источников

1. Садыхов Г.С., Савченко В.П., Елисеева О.В. Основы оценок остаточного ресурса изделий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2011. № S3. С. 83–99.
2. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: РСТ, 2021. 35 с.
3. ГОСТ 25870–83. Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1984. 176 с.
4. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1 (11). С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
5. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Мальцева Е.Ю. Влияние армирующих добавок на структуру и теплофизические свойства ледяных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
6. Hakimian A., Mohebinia M., Nazari M. et al. Freezing of few nanometers water droplets // Nature Communications. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-27346-w.

7. Матвеева Л.Ю., Ястребинская А.В. Взаимосвязь надмолекулярной структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 49–54. DOI: 10.12737/article_5a27cba0904cd3.84567882.
8. Скачков Ю.Б. Динамика многолетних изменений экстремумов температуры воздуха в г. Якутске // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. № 1. С. 185–187. DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-185-187.
9. 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: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
10. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
11. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулев К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 9. С. 24–31.
13. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Ammar M.A. Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions: Thesis. Quebec, 2014. 105 p.
15. Parnas R., Shaw M., Liu Q. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites: Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 2007. 133 p.
16. Alaimo G., Valenza A., Enea D., Fiore V. The durability of basalt fibres reinforced polymer (BFRP) panels for cladding // Materials and Structures. 2016. Vol. 49. No. 6. P. 2053–2064. DOI: 10.1617/s11527-015-0633-3.
17. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. No. 7. P. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
18. Liu Q., Shaw M.T., Parnas R.S., McDonnell A.-M. Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation // Polymer Composites. 2006. Vol. 27. P. 41–48. DOI: 10.1002/pc.20162.
19. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites // Composites. Part B: Engineering. 2015. Vol. 73. No. 5. P. 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
20. Chikhradze N.M., Japaridze L.A., Abashidze G.S. Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions // Composites and their applications. Intech Open, 2012. P. 243–268. DOI: 10.5772/48289.
21. Matykiewicz D., Lewandowski K., Dudziec B. Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane // Composite Interfaces. 2017. Vol. 24. No. 5. P. 489–498.
22. ACI 440.3R-04. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills: The American Concrete Institute, 2004. 40 p.
23. Акатенков Р.В., Алексахин В.М., Аношкин И.В., Бабин А.Н., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В., Минаков В.Т., Раков Э.Г. Критерий эффективности использования функционализированных углеродных нанотрубок для улучшения физико-механических свойств эпоксидных смол // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3 (16). С. 22–27.
24. Королев Г.В., Могилев М.М., Голиков И.В. Сетчатые полиакрилаты. Микрогетерогенные структуры, физические сетки, деформационно-прочностные свойства. М.: Химия, 1995. 275 с.

25. Кычкин А.К., Попов В.В., Кычкин А.А. Исследование влияния экстремально холодного климата на свойства базальтопластиковых стержней // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 2 (94). С. 25–31. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31.
26. Кычкин А.К., Попов В.В., Кычкин А.А. Климатическая стойкость базальтокомпозитных арматур // Наука и образование. 2017. № 1 (85). С. 71–74.
27. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // Тр. VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013 (24–29 июня 2013 г., г. Якутск). Якутск, 2013. С. 5–7.

References

1. Sadykhov G.S., Savchenko V.P., Eliseeva O.V. Basics of Estimating the Residual Life of Products. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Natural Sciences*, 2011, no. S3, pp. 83–99.
2. State Standard R 27.102–2021. *Reliability in Engineering. Object Reliability. Terms and Definitions*. Moscow: RST, 2021, 35 p.
3. State Standard 25870–83. *Macroclimatic regions of the globe with cold and temperate climates. Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes*. Moscow: Publ. House of Standards, 1984, 176 p.
4. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in extremely cold climates. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (11), pp. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
5. Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Maltseva E.Yu. The effect of reinforcing additives on the structure and thermophysical properties of ice composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
6. Hakimian A., Mohebinia M., Nazari M. et al. Freezing of few nanometers water droplets. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-27346-w.
7. Matveeva L.Yu., Yastrebinskaya A.V. Relationship between the supramolecular structure and properties of polymer composite materials based on thermosetting binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2017, no. 12, pp. 49–54. DOI: 10.12737/article_5a27cba0904cd3.84567882.
8. Skachkov Yu.B. Dynamics of long-term changes in air temperature extremes in Yakutsk. *Integrity and resource in extreme conditions*, 2024, no. 1, pp. 185–187. DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-185-187.
9. 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: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
10. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
11. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. The influence of operational factors on the properties of carbon fiber based on polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Startsev V.O., Kutsevich K.E., Khrulev K.A., Molokov M.V. Predicting the surface temperature of composite material samples based on adhesive prepregs when exposed to climatic conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 9, pp. 24–31.
13. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Ammar M.A. *Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions*: Thesis. Quebec, 2014, 105 p.
15. Parnas R., Shaw M., Liu Q. *Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites*: Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 2007, 133 p.

16. Alaimo G., Valenza A., Enea D., Fiore V. The durability of basalt fibres reinforced polymer (BFRP) panels for cladding. *Materials and Structures*, 2016, vol. 49, no. 6, pp. 2053–2064. DOI: 10.1617/s11527-015-0633-3.
17. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
18. Liu Q., Shaw M.T., Parnas R.S., McDonnell A.-M. Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation. *Polymer Composites*, 2006, vol. 27, pp. 41–48. DOI: 10.1002/pc.20162.
19. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 73, no. 5, pp. 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
20. Chikhradze N.M., Japaridze L.A., Abashidze G.S. Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions. *Composites and their applications*. Intech Open, 2012, pp. 243–268. DOI: 10.5772/48289.
21. Matykiewicz D., Lewandowski K., Dudziec B. Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane. *Composite Interfaces*, 2017, vol. 24, no. 5, pp. 489–498.
22. ACI 440.3R-04. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills: The American Concrete Institute, 2004, 40 p.
23. Akatenkov R.V., Aleksashin V.M., Anoshkin I.V., Babin A.N., Bogatov V.A., Grachev V.P., Kondrashov S.V., Minakov V.T., Rakov E.G. Criterion of the application efficiency of functionalized carbon nanotubes for improving the physico-mechanical properties of epoxy resins. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2010, no. 3, pp. 22–27.
24. Korolev G.V., Mogilev M.M., Golikov I.V. *Network polyacrylates. Microheterogeneous structures, physical networks, deformation and strength properties*. Moscow: Khimiya, 1995, 275 p.
25. Kychkin A.K., Popov V.V., Kychkin A.A. Study of the influence of extremely cold climate on the properties of basalt-plastic rods. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 2 (94), pp. 25–31. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31.
26. Kychkin A.K., Popov V.V., Kychkin A.A. Climatic resistance of basalt-composite reinforcement. *Nauka i obrazovanie*, 2017, no. 1 (85), pp. 71–74.
27. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic testing of materials, structural elements, machinery and equipment under conditions of extremely low temperatures. *Proc. VI Eurasian Symposium on Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.

Информация об авторах

Мараховский Петр Сергеевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кычкин Айсен Анатольевич, старший научный сотрудник, к.т.н., ФИЦ ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ys.ru

Скуридина Наталья Степановна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кычкин Анатолий Константинович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Габышев Александр Александрович, младший научный сотрудник, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, presidium@prez.ys.ru

Information about the authors

Peter S. Marakhovskiy, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aisen A. Kychkin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), FRC YaSC SB RAS, presidium@prez.ys.ru

Natalia S. Skuridina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly K. Kychkin, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), IPTPN SB RAS, administration@iptpn.ysn.ru

Alexander A. Gabyshev, Junior Researcher, FRC YaSC SB RAS, presidium@prez.ys.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.04.2025.
The article was submitted 16.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 16.04.2025.

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125

ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА СО СТАНДАРТНЫМ МОДУЛЕМ УПРУГОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КНР

А.И. Старков¹, К.Е. Куцевич¹, А.Ю. Исаев¹, Я.А. Вахрушева¹, П.М. Путилина¹

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

Аннотация. Для волокна исследованы геометрические параметры сечения, кристаллическая структура, массовая доля аппрета, линейная плотность и плотность, геометрические параметры сечения микропластика, прочность и модуль упругости при растяжении, удлинение при разрыве в микропластике. Для углепластика определены предел прочности и модуль упругости при растяжении и изгибе, прочность при сжатии, пределы прочности при сдвиге в плоскости листа и межслойном сдвиге, прочность криволинейной балки, трансверсальная прочность, остаточная прочность при сжатии после удара, удельная работа расслоения в условиях отрыва и сдвига, исследована микроструктура углепластиков.

Ключевые слова: углеродное волокно, углепластик, клеевой препрег, параметры углеродных волокон, параметры углепластика

Для цитирования: Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Вахрушева Я.А., Путилина П.М. Исследования свойств высокопрочного углеродного волокна со стандартным модулем упругости производства КНР // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH STANDARD MODULUS CARBON FIBER PRODUCED IN CHINA

A.I. Starkov¹, K.E. Kutsevich¹, A.Yu. Isaev¹, Ya.A. Vahrusheva¹, P.M. Putilina¹

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

Abstract. The article presents the results of investigation of the following properties of fiber: geometric cross-sectional characteristics, crystal structure, mass fraction of the dressing, linear density and fiber density, geometric cross-sectional characteristics of microplastics, tensile strength, modulus of elasticity and elongation at break of the microplastics. For carbon fiber reinforced plastic (CFRP) the following properties were determined: ultimate strength and modulus of elasticity under tension and bending, compressive strength, in-plane and interlaminar shear strength, curved beam strength, transversal strength, residual compressive strength after impact, specific interlaminar fracture toughness under Mode I and Mode II loading conditions. At the same time the microstructures of carbon fiber plastics were studied.

Keywords: carbon fiber, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), adhesive prepreg, characteristics of carbon fibers, characteristics of carbon

For citation: Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Vahrusheva Ya.A., Putilina P.M. Investigation of the properties of high-strength standard modulus carbon fiber produced in China. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в силовых конструкциях авиакосмической и других видов техники, что позволяет усовершенствовать аэродинамические характеристики планера летательных аппаратов с одновременным обеспечением весовой эффективности [1]. В последнее время при создании ПКМ широко используют клеевые препреги, в которых пропитка тканевого наполнителя (стекло- и углеродной ткани) осуществляется расплавом эпоксидного связующего по расплавной технологии [2–14].

Углеродные волокна получают путем контролируемого пиролиза волокон-прекурсоров: полиакрилонитрильных, из изотропного и мезофазного пека, вискозы и фенолформальдегидных смол. Перед пиролизом волокна вытягивают и стабилизируют на воздухе при температуре 100–400 °С (точная температура зависит от природы прекурсора).

Значения прочности и модуля упругости зависят как от исходного вещества, из которого получают углеродные волокна, так и от условий их термообработки на всех стадиях получения. При увеличении температуры термообработки с температуры карбонизации (1300 °С) до температуры графитизации (2800 °С) происходит увеличение объемной плотности углеродного волокна. Одновременно с этим уменьшается прочность при растяжении и увеличивается модуль упругости углеродного волокна. После термообработки при температуре 2800 °С значения прочности и модуля упругости углеродных волокон на основе изотропного пека составляют соответственно 600 МПа и 30 ГПа, углеродного волокна на основе мезофазного пека: 2100 и 520 МПа, углеродного волокна из полиакрилонитрила: 2500 МПа и 300 ГПа [15–18].

Существенный рост использования ПКМ за последние 20 лет привел к увеличению в КНР предприятий-производителей углеродных волокон различных номиналов с разным уровнем прочностных характеристик.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан углепластик марки ВКУ-30К.УВ из клеевого препрега марки КМКУ-3м.150.УВ на основе высокопрочного углеродного жгутового наполнителя производства КНР и безрастворного клеевого связующего ВСК-14-3. В процессе работы всесторонне исследовано высокопрочное углеродное волокно марки УВ-12К со стандартным модулем упругости и углепластик на его основе. Полученные данные представляют большой интерес для конструкторов авиационной техники для оценки применения данного материала в высоконагруженных элементах летательного аппарата и прогнозирования их поведения.

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

Материалы и методы

Объектом исследования является разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластик ВКУ-30К.УВ на основе углеродного волокна производства КНР.

С целью изучения однородности свойств углеродного волокна производства КНР и оценки его влияния на свойства углепластика марки ВКУ-30К.УВ проведены исследования, включающие следующие основные методики и виды испытаний:

для углеродного волокна

– определение геометрических параметров сечения элементарного волокна (ГОСТ 32666–2014);

– исследование кристаллической структуры – межплоскостного расстояния и размеров кристаллитов – методом рентгеноструктурного анализа (МИ 1.2.017–2010);

- определение массовой доли аппрета на волокне (ГОСТ Р ИСО 10548–2012);
 - определение линейной плотности волокна (ГОСТ 6943.1–2015 (ISO 1889:2009));
 - определение плотности волокна (ГОСТ Р ИСО 10119–2012 метод А);
 - определение геометрических параметров сечения микропластика (ГОСТ 32666–2014 метод С);
 - определение в микропластике прочности и модуля упругости при растяжении, а также удлинения при разрыве по ГОСТ Р ИСО 10618–2012;
 - исследование термической деструкции в инертной среде углеродного наполнителя с нанесенным аппретом методом термогравиметрического анализа (ГОСТ Р 56721–2015);
 - определение удельной разрывной нагрузки при разрыве петель углеродного волокна (ГОСТ 28008–88) по длине бобины;
 - определение предела прочности при растяжении нити в «сухом пучке» (ГОСТ 6611.2–73) по длине бобины;
- для углепластика*
- определение предела прочности и модуля упругости при растяжении на образцах со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ Р 56785–2015);
 - определение прочности при сжатии на образцах со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ Р 56812–2015);
 - определение предела прочности и модуля упругости при изгибе на образцах со схемами армирования [0] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ 25.604–82);
 - определение предела прочности при сдвиге в плоскости листа на образцах со схемой армирования [± 45] (ГОСТ 32658–2014);
 - определение предела прочности при межслойном сдвиге на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 57745–2017);
 - определение прочности криволинейной балки на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 57041–2016);
 - определение трансверсальной прочности по методике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на образцах со схемой армирования [± 45] (СТО 1-595-30-639–2022);
 - определение остаточной прочности при сжатии после удара с удельной энергией 6,67 Дж/мм на образцах со схемой армирования [+45/0/–45/90] (ГОСТ 33495–2015);
 - определение удельной работы расслоения в условиях отрыва на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 56815–2015);
 - определение удельной работы расслоения в условиях сдвига на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 33685–2015);
 - исследование микроструктуры углепластиков методом сканирующей электронной микроскопии (МИ 1.2.035–2011).

Результаты и обсуждение

Для изучения свойств углеродного волокна производства КНР проведены исследования его сечения (рис. 1) – отобрано по одному образцу через каждые 25 м на протяжении всей длины волокна (1250 м).

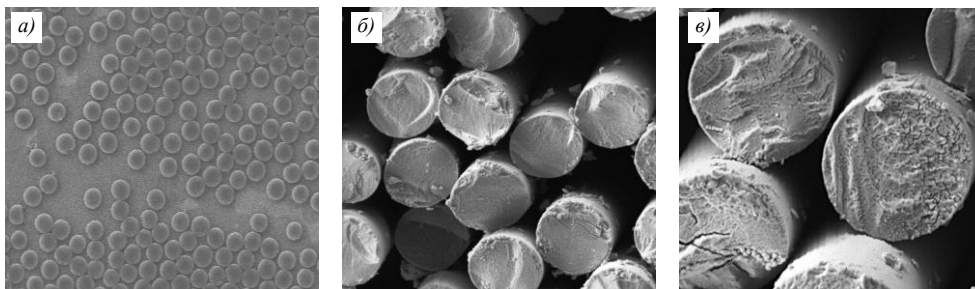


Рис. 1. Микроструктура ($\times 2000$ (а); $\times 10000$ (б); $\times 20000$ (в)) сечения углеродного волокна УВ-12К производства КНР

Усредненные значения геометрических параметров сечения волокна УВ-12К производства КНР по 50-ти образцам с бобины следующие:

Диаметр, мкм	$6,7 \pm 0,02$
Длина, мкм	$6,9 \pm 0,02$
Ширина, мкм	$6,4 \pm 0,03$
Вытянутость, мкм	$1,1 \pm 0,004$

Форма поперечного сечения исследованных образцов углеродного волокна УВ-12К производства КНР – круглая с фибрилизованной поверхностью. Подобные элементы рельефа поверхности являются концентраторами напряжений и в зависимости от условий нагружения приводят к неоднородному напряженному состоянию в волокне, снижая его прочность и деформативность, в том числе в составе ПКМ.

Методом рентгеноструктурного анализа проведено исследование кристаллической структуры углеродного волокна производства КНР. Определены межплоскостные расстояния и размеры кристаллитов в моноволокнах (рис. 2, табл. 1).

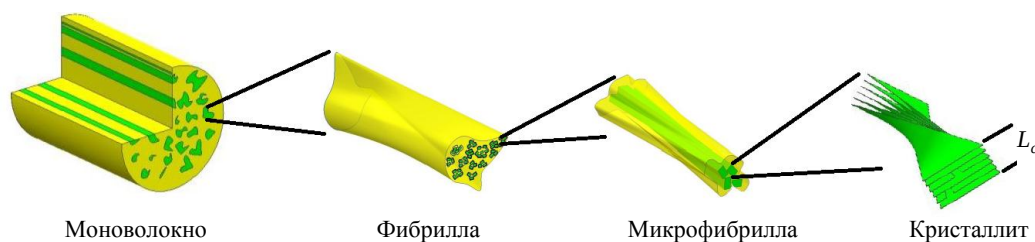


Рис. 2. Схема кристаллической структуры углеродного волокна

Таблица 1

Значения структурных параметров образцов углеродного волокна

Угловое положение рефлексов 2θ , градус	Межплоскостное расстояние, нм	Длина кристаллита, нм	Площадь сечения кристаллита, нм ²
d_{0002}	25,42	0,350	2,33
d_{0100}	43,84	0,207	
d_{0004}	53,30	0,172	

Проведены испытания по определению температуры деструкции углеродного волокна марки УВ-12К производства КНР (рис. 3). Установлено, что средняя температура деструкции составила 715,24 °С.

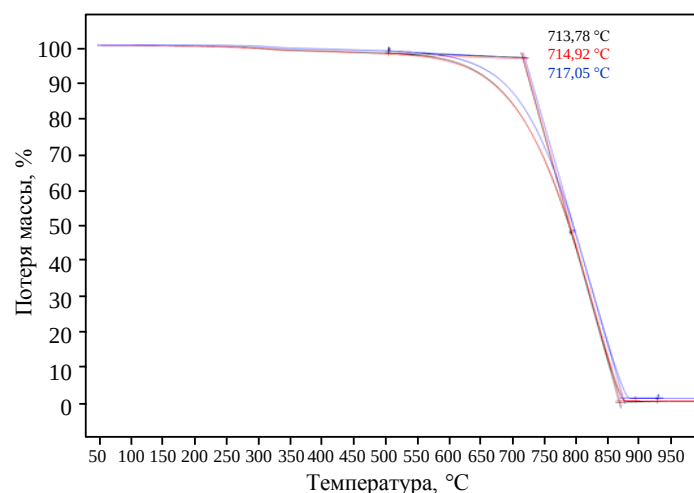


Рис. 3. Температура деструкции углеродного волокна марки УВ-12К производства КНР в среде инертного газа

С использованием связующего ВСЭ-30 изготовлены образцы микропластиков из углеродного волокна УВ-12К и определены геометрические параметры сечения полученных микропластиков (рис. 4).

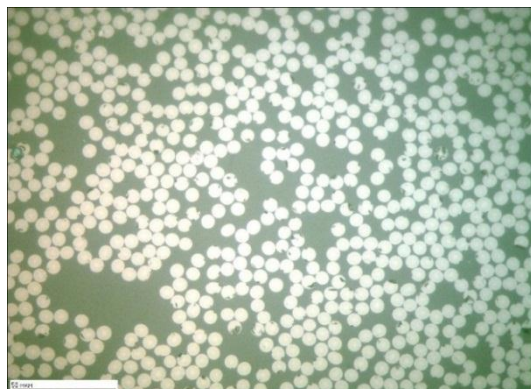


Рис. 4. Микроструктура ($\times 500$) сечения микропластика из углеродного волокна производства КНР

Усредненные значения геометрических параметров сечения микропластика из углеродного волокна производства КНР следующие:

Диаметр, мкм	$6,8 \pm 0,02$
Длина, мкм	$7,1 \pm 0,02$
Ширина, мкм	$6,5 \pm 0,02$
Вытянутость, мкм	$1,09 \pm 0,002$

Проведено исследование характеристик углеродного волокна производства КНР при растяжении в микропластике, линейной плотности и массовой доли аппрета на волокнах в десяти точках на участке 900 м по длине бобины с интервалом отбора образцов 100 м. Образцы микропластиков изготовлены с использованием связующего ВСЭ-30. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты определения физико-механических характеристик
по длине бобины углеродного волокна производства КНР
при растяжении в микропластике и массовой доли аппрета**

Условный номер точки	Линейная плотность, текс	Объемная плотность, кг/м^3	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Массовая доля аппрета, %
1	810	1,82	4,77	235	2,02	1,1
2	801	1,78	4,56	233	1,94	1,1
3	823	1,82	4,84	230	2,10	1,1
4	807	1,81	4,88	230	2,10	1,2
5	811	1,83	4,87	238	2,04	1,1
6	809	1,80	4,64	237	1,90	1,1
7	805	1,79	4,63	235	1,94	1,1
8	803	1,78	4,90	234	2,10	1,1
9	810	1,80	4,82	234	2,06	1,1
10	819	1,81	4,67	227	2,00	1,1

Исходя из анализа результатов испытаний углеродного волокна УВ-12К производства КНР, представленных в табл. 2, установлено, что среднее значение линейной плотности составляет 810 текс (*вариация* 0,83 %), объемная плотность 1,80 кг/м³ (*вариация* 0,86 %), прочность при растяжении микропластика 4,76 ГПа (*вариация* 2,58 %), модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике 233,3 ГПа (*вариация* 1,46 %).

Проведены испытания углеродного волокна производства КНР по определению показателей линейной плотности, удельной разрывной нагрузки при разрыве петель и прочности при растяжении нити в «сухом пучке» по всей длине бобины (5000 м). Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения характеристик по длине бобины углеродного волокна производства КНР

Характеристика	Значения характеристик*
Линейная плотность, текс	$\frac{732-791}{764}$
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс: – при разрыве нити петель	$\frac{48,1-75,7}{65,8}$
<i>Вариация</i> , %	5,9
– при растяжении нити в «сухом пучке»	$\frac{113,6-136,5}{124,8}$
<i>Вариация</i> , %	3,2
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.	

Для проведения исследования волокна на определение линейной плотности отобрано по 2000 образцов в тысяче точек по всей длине волокна в бобине – через каждые 5 м (по два образца на одну точку). Минимальное допустимое значение линейной плотности для волокна производства КНР, согласно ТУ 1-595-11-1407–2021, составляет 780 текс, максимальное: 820 текс.

По результатам анализа полученных данных по показателю удельной разрывной нагрузки при разрыве петель установлено, что среднее значение показателя для углеродного волокна производства КНР составило 65,8 сН/текс.

Для исследования свойств углепластика марки ВКУ-30К.УВ изготовлены образцы клеевых препрегов (на основе углеродного наполнителя из волокна производства КНР) путем нанесения расплава клеевого связующего на антиадгезионную бумагу (подложку) из верхнего и нижнего клеенаносящих узлов с использованием систем обогреваемых валов, последующего двухстороннего дублирования угленанполнителей с пленками клеевого связующего в узлах обогреваемых каландров и смотки клеевых препрегов через антиадгезионную прокладку в рулон.

Автоклавным методом формования из клеевого препрега марки КМКУ-3м.150.УВ.37 изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-30К.УВ и проведены исследования их механических свойств при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45], результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ
при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге**

Схема армирования (толщина образца)	Значения свойств при						
	растяжении		сжатии		изгибе		межслойном сдвиге $F_{сдв}$, МПа
	σ_B , МПа	E , ГПа	$\sigma_{B,сж}$, МПа	$E_{сж}$, ГПа	$\sigma_{B,из}$, МПа	$E_{из}$, ГПа	
[0]	1604	123	978	123	2002	117,9	90,1
[90] (2,5 мм)	61	9	216	11	—	—	—
[90] (4,5 мм)	55	9	—	—	—	—	—
[0/–45/90/+45]	618	56	444	45	1176	71,8	—

Проведены исследования механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ при сдвиге в плоскости армирования, сжатии после удара, изгибе изогнутой балки со схемами армирования $[\pm 45]$, $[+45/0/-45/90]$ и $[0]$, результаты которых представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ
при сдвиге в плоскости листа, сжатии после удара и изгибе криволинейной балки
(r – радиус изгиба)**

Схема армирования	Значения свойств при			
	сдвиге в плоскости листа		сжатии после удара $\sigma_{B,спу}$, МПа	изгибе криволинейной балки σ_r , Н/м ²
	τ_{12} , МПа	G_{12} , ГПа		
$[\pm 45]$	80,8	5,69	—	—
$[+45/0/-45/90]$	—	—	136	—
[0]	—	—	—	57,7

Проведены исследования механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ при работе расслоения в условиях сдвига и отрыва, а также при трансверсальном отрыве со схемами армирования $[\pm 45]$ и $[0]$, результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ
при работе расслоения в условиях сдвига и отрыва, а также трансверсальном отрыве**

Схема армирования	Удельная работа расслоения в условиях, кДж/м ²		Трансверсальная прочность, МПа
	отрыва G_{Ic}	сдвига G_{IIc}	
[0]	0,22	0,65	—
$[\pm 45]$	—	—	6,5

Проведено исследование микроструктуры углепластика марки ВКУ-30К.УВ: форма поперечного сечения волокон – круглая, поверхность волокон – гладкая. Волокна характеризуются структурой «ядро–оболочка» (рис. 5).

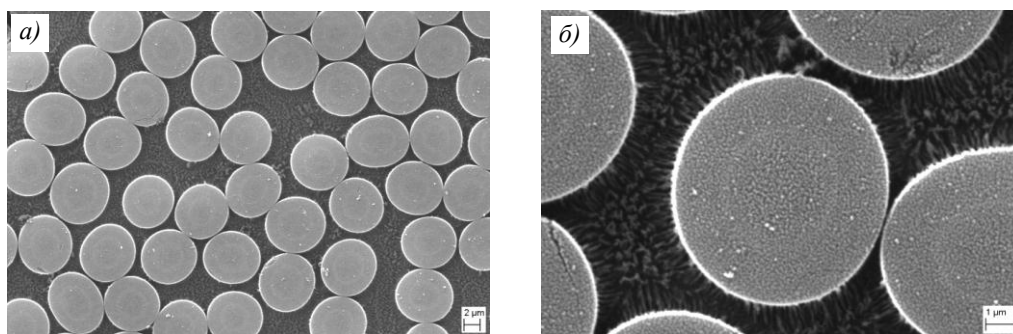


Рис. 5. Микроструктура ($\times 5000$ (а); $\times 20000$ (б)) углеродного волокна производства КНР в углепластике марки ВКУ-30К.УВ

Заключения

Проведено исследование свойств углеродного волокна производства КНР с целью оценки влияния волокон на свойства углепластика марки ВКУ-30К.УВ. В десяти точках на протяжении 900 м по длине бобины (одна точка на каждые 100 м) определены следующие свойства углеродного волокна: линейная и объемная плотность, массовая доля аппрета, а также прочность, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении микропластика. Так, линейная плотность исследуемого углеродного волокна составляет 815 ± 8 текс (среднее значение 810 текс), объемная плотность $1,80 \pm 0,02$ кг/м³ (среднее значение 1,80 кг/м³), прочность при растяжении микропластика $4,72 \pm 0,16$ ГПа (среднее значение 4,76 ГПа), модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике $232,5 \pm 5,5$ ГПа (среднее значение 233,3 ГПа).

Удельные разрывные нагрузки при растяжении в «сухом пучке» и при разрыве петель определены по всей длине волокна в бобине: значения измеряли в тысяче точек (одна точка на каждые 5 м). Так, удельная разрывная нагрузка при разрыве петель составляет $61,9 \pm 13,8$ сН/текс (среднее значение 65,8 сН/текс), прочность при растяжении в «сухом пучке» $125 \pm 11,5$ сН/текс (среднее значение 124,8 сН/текс).

Проведены микроскопические исследования структуры волокон, а также их кристаллической структуры и термической деструкции в инертной среде. Форма поперечного сечения исследованных образцов углеродного волокна УВ-12К производства КНР – круглая с фибрилизованной поверхностью. При этом средний диаметр монофиламента составляет $6,7 \pm 0,02$ мкм, средняя ширина $6,4 \pm 0,03$ мкм, площадь сечения кристаллита в составе монофиламента $2,33$ нм², а температура деструкции в среде инертного газа $715,24$ °С.

На основе волокон производства КНР получена партия клеевого препрега углепластика марки КМКУ-3м.150.УВ.37. Автоклавным методом формования из клеевого препрега изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-30К.УВ.

Проведены испытания образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ с различными видами укладки при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге в плоскости армирования, межслойном сдвиге, сжатии после удара, изгибе изогнутой балки; определены прочность при трансверсальном отрыве, удельная работа расслоения в условиях отрыва и сдвига. Полученные результаты свидетельствуют о принадлежности материала к категории высокопрочных конструкционных углепластиков.

Полученные данные представляют интерес для конструкторов авиационной техники, так как могут использоваться для оценки применения данного материала в высоконагруженных элементах летательного аппарата и прогнозирования их поведения.

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. 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.
2. 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.
3. 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: 18.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
4. 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: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
5. 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.
6. 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: 18.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
7. 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.
8. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
9. Способ изготовления пленочных клеев и клеевых препрегов с термореактивным полимерным связующим и устройство для его осуществления: пат. 2254172С1 Рос. Федерация; заявл. 31.05.04; опубл. 20.06.05.
10. Garcia F.G., Soares B.G., Pita V.J.R.R. et al. Mechanical properties of epoxy networks based on DGEBA and aliphatic amines // Journal of Applied Polymer Science. 2007. No. 3. P. 2047–2055. DOI: 10.1002/app.24895.
11. Brostow W., Goodman S.H., Wahrmund J. Handbook of Thermoset Plastics. 3rd ed. Plastics Design Library, 2014. P. 191–252. DOI: 10.1016/978-1455731077.
12. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of fast curing epoxy resins with isophorone diamine and N-(3 aminopropyl)-imidazole // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. P. 1–10. DOI: 10.1002/APP.47950.
13. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin /1-benzyl-2-methylimidazole / isophorone diamine system // Thermochimica Acta. 2020. Vol. 690. P. 178657. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178657.

14. Aufray M. Physico-chemical characterization of epoxy-amine / metal interphases, characterization of their constituents: Dissertation PhD. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005. 186 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281600273> (дата обращения: 18.05.2025).
15. Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
16. Варшавский В.Я. Углеродные волокна. М.: Варшавский В.Я., 2005. 496 с.
17. Углеродные волокна и углекомпозиаты / под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988. 338 с.
18. Tagawa M., Ohmae N., Umeno M. et al. Surface Characterization of Carbon Fibers Exposed to 5 eV Energetic Atomic Oxygen Beam Studied by Wetting Force Measurements // Japanese Journal of Applied Physics. 1991. Vol. 30. P. 2134–2138.

References

1. 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.
2. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders, and adhesive prepregs: a textbook*. Ed. by E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
3. 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: May 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
4. 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: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
5. 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.
6. 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: May 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
7. 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 tekhnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
8. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
9. *Method for producing film adhesives and adhesive prepregs with a thermosetting polymer binder and a device for implementing it*: pat. 2254172C1 Rus. Federation; appl. 31.05.04; publ. 20.06.05.
10. Garcia F.G., Soares B.G., Pita V.J.R.R. et al. Mechanical properties of epoxy networks based on DGEBA and aliphatic amines. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, no. 3, pp. 2047–2055. DOI: 10.1002/app.24895.
11. Brostow W., Goodman S.H., Wahrmund J. *Handbook of Thermoset Plastics*. 3rd ed. Plastics Design Library, 2014, pp. 191–252. DOI: 10.1016/978-1455731077.
12. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of fast curing epoxy resins with isophorone diamine and N-(3 aminopropyl)-imidazole. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, pp. 1–10. DOI: 10.1002/APP.47950.
13. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin / 1-benzyl-2-methylimidazole / isophorone diamine system. *Thermochimica Acta*, 2020, vol. 690, p. 178657. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178657.

14. Aufray M. *Physico-chemical characterization of epoxy-amine / metal interphases, characterization of their constituents*: Dissertation PhD. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, 186 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/281600273> (accessed: May 18, 2025).
15. Sidorina A.I., Safronov A.M. Study of the resistance of carbon fibers to oxidation. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
16. Varshavsky V.Ya. *Carbon Fibers*. Moscow: Varshavsky V.Ya., 2005, 496 p.
17. *Carbon Fibers and Carbon Composites*. Ed. E. Fitzer. Moscow: Mir, 1988, 338 p.
18. Tagawa M., Ohmae N., Umeno M. et al. Surface Characterization of Carbon Fibers Exposed to 5 eV Energetic Atomic Oxygen Beam Studied by Wetting Force Measurements. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 30, pp. 2134–2138.

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

Вахрушева Яна Андреевна, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Путилина Полина Максимовна инженер, 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

Yana A. Vahrucheva, Deputy Head of Science-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Polina M. Putilina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.08.2025.
The article was submitted 01.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.08.2025.

Научная статья

УДК 629.7.023.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО АЛЮМИНИЙ-ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ

Д.А. Софронова¹, В.Н. Ярошевская¹, М.А. Кольцова¹,
С.Л. Лонский¹, А.В. Князев¹, Е.В. Куршев¹

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

Аннотация. Исследовано влияние состава порошковой смеси и режимов термообработки на формирование термодиффузионных алюминий-цинковых покрытий. Установлено, что при температуре формирования 450 °С покрытия имеют внешний слой на основе алюминия. При температуре 380 °С заметной дифференциации слоев в покрытии не наблюдается, содержание алюминия в цинковой матрице составляет 10 %. Явного влияния состава смеси и режима термообработки на плотность тока и потенциал коррозии не установлено. В среде 3%-ного раствора NaCl плотность тока и потенциал коррозии составляют 10^{-6} А/см² и 0,9 В соответственно.

Ключевые слова: термодиффузионные покрытия, цинк, алюминий, сталь, коррозия, защитные покрытия

Для цитирования: Софронова Д.А., Ярошевская В.Н., Кольцова М.А., Лонский С.Л., Князев А.В., Куршев Е.В. Влияние состава порошковой смеси и продолжительности термообработки на свойства термодиффузионного алюминий-цинкового покрытия // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136.

Scientific article

THE IMPLICATION OF POWDER MIXTURE COMPOSITION AND HEAT TREATMENT DURATION ON THE PROPERTIES OF THERMAL DIFFUSION ALUMINIUM-ZINC COATING

D.A. Sofronova¹, V.N. Yaroshevskaya¹, M.A. Koltsova¹,
S.L. Lonskii¹, A.V. Knyazev¹, E.V. Kurshev¹

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

Abstract. The influence of the composition of the powder mixture and of the heat treatment modes upon the formation of thermodiffusional aluminium-zinc coatings has been investigated. It was found that at a temperature of 450 °C the coatings have aluminium based outer layer, at a temperature of 380 °C the aluminum content in the zinc is about 10 %. The obvious influence of the composition of the mixture and of the heat treatment regime on the corrosion properties has not been established, the corrosion current is in the order of 10^{-6} A/cm², and the corrosion potential is about 0,9 V in 3 % NaCl solution.

Keywords: thermodiffusion coatings, zinc, aluminium, steel, corrosion, protective coatings

For citation: Sofronova D.A., Yaroshevskaya V.N., Koltsova M.A., Lonskii S.L., Knyazev A.V., Kurshev E.V. The implication of powder mixture composition and heat treatment duration on the properties of thermal diffusion aluminium-zinc coating. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-126-136.

Введение

Важнейшими задачами государственной промышленной политики в области авиастроения являются разработка и производство конкурентоспособных изделий гражданской вертолетной техники [1–4]. Однако в настоящее время для изготовления конструкций изделий вертолетной техники применяется существенная доля импортных материалов. В силу текущей санкционной политики в отношении Российской Федерации необходимо снизить зависимость авиационной промышленности от разработок и поставок материалов и полуфабрикатов иностранного производства [2, 3].

В Российской Федерации для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники в основном применяют кадмиевое и цинковое покрытия, наносимые гальваническим способом [4–6]. Однако с экологической точки зрения гальванические покрытия являются опасными вследствие высокого содержания ионов тяжелых металлов, неорганических кислот и щелочей в промывных и сточных водах [7]. В последние годы в мировой практике большое внимание сосредоточено на получении защитных покрытий путем термодиффузионного насыщения [8, 9]. Данный метод позволяет обеспечить коррозионную стойкость деталей, свести к минимуму экологически опасные гальванические процессы на производстве, снизить трудоемкость нанесения покрытий, а также расходы на хранение и утилизацию отработанных электролитов [10]. Кроме того, из-за бурного развития аддитивных технологий возникает необходимость повторного использования отходов порошков после селективного лазерного сплавления [11]. Одним из способов решения этой проблемы является применение металлических порошкообразных отходов в целях нанесения термодиффузионных покрытий.

Важной особенностью термодиффузионного метода является возможность получения сплошного и равномерного по толщине покрытия на изделиях любой формы [12, 13]. Принцип термодиффузии заключается в химическом и структурном насыщении поверхности подложки атомами осаждаемой смеси из газовой (паровой) фазы или контактно при термической обработке. В дальнейшем происходят диффузия этих атомов в структуру нагретого материала подложки, а также последующее формирование и развитие новых фаз, твердых растворов [14]. Соответствующие химические реакции осуществляются в закрытой камере, содержащей порошковую смесь, детали, инертный наполнитель, не позволяющий порошку спекаться, и, как правило, активатор, служащий переносчиком атомов диффундирующего элемента от порошковой смеси к поверхности насыщаемой детали. В качестве активатора выбирают вещества, легко разлагающиеся при повышенной температуре, вступающие в реакцию с насыщающим веществом с образованием газообразных продуктов реакции. Образовавшиеся новые фазы обладают необходимыми эксплуатационными свойствами: повышенная химическая стабильность, высокая твердость и другие, которые способствуют коррозионной стойкости и износостойкости [15].

Следует отметить, что покрытия из смеси алюминия и цинка обладают более высокой коррозионной стойкостью, чем цинковые [16]. При этом для их формирования требуется существенно более низкая температура, чем для термодиффузионных алюминиевых покрытий [17]. Так, термодиффузионное цинкование проводят в интервале температур от 350 до 450 °С, а алюмоцинкование – от 380 до 500 °С [18]. Данные температуры соответствуют температурам отпуска некоторых конструкционных сталей [19], что позволяет наносить алюминий-цинковые покрытия на стали, для которых неприменимо термодиффузионное алитирование ввиду чрезмерно высокой температуры процесса.

Выбор алюминия и цинка в качестве компонентов защитного покрытия неслучаен. Оба металла обеспечивают анодную защиту основного металла (в данном случае – железа), так как обладают высоким отрицательным значением окислительно-восстановительного потенциала [20, 21]. Кроме того, в случае слоистой структуры алюминий будет оказывать анодное защитное действие на цинк, предотвращая его растворение, что увеличит протекторную способность покрытия.

Таким образом, смеси на основе порошков цинка и алюминия являются наиболее приемлемыми для нанесения термодиффузионных покрытий на конструкционные стали.

Материалы и методы

На образцах из стали 45 диаметром 25 мм и толщиной 3 мм методом термодиффузионного нанесения формировали покрытия из порошковой смеси на основе порошков цинка и алюминия с добавлением корунда в качестве инертного наполнителя и хлорида аммония в качестве активатора. Исследованы смеси порошков 1 и 2 с соотношением цинка и алюминия 7:3 и 8:2 соответственно.

Для формирования термодиффузионного покрытия образцы засыпали порошковой смесью в стальном тигле с герметично закручивающейся крышкой так, чтобы они не касались друг друга и стенок тигля. Затем проводили термическую обработку в муфельной печи при температурах 380 и 450 °С. Для этого тигли с образцами помещали в разогретую до заданной температуры печь и выдерживали в течение 4–8 ч. По окончании термообработки тигли с образцами извлекали из печи и охлаждали на воздухе. После полного охлаждения образцы, очищали от остатков порошковой смеси и готовили к исследованиям.

Микроструктуру покрытий исследовали с помощью инвертированного металлографического микроскопа при увеличении $\times 50$ в светлом поле. Перед металлографическими исследованиями изготавливали микрошлифы поперечного сечения образцов с покрытиями, проводили металлографическое травление. Для выявления микроструктуры, определения толщины покрытия и его структурных составляющих металлографическое травление проводили в реактиве «Ниталь» (5%-ный раствор азотной кислоты в этаноле) [9, 22] в течение 3–5 с.

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ элементного состава образцов с термодиффузионным покрытием (с различным составом порошковой смеси и продолжительностью термообработки) осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ по ГОСТ 22309–2015.

Коррозионные свойства оценивали по значениям электрохимических характеристик в 3%-ном растворе хлорида натрия при нормальных условиях. Для измерений использовали классическую трехэлектродную ячейку, в качестве рабочего электрода – образцы из стали 45 с термодиффузионными покрытиями. Потенциал рабочего электрода измеряли относительно хлоридсеребряного (Ag/AgCl) электрода сравнения с потенциалом $E = +(197 \pm 3)$ мВ (здесь и далее – относительно нормального водородного электрода). Противоеlectродом служила платинированная титановая сетка. Исследование и обработку данных проводили с помощью потенциостат-гальваностата с комплектом программного обеспечения. Электрохимические измерения осуществляли путем определения потенциала разомкнутой цепи (E_{PC}), а также методом линейной вольтамперометрии при регистрации кривых в области потенциалов от –250 до +250 мВ относительно E_{PC} [23].

Результаты и обсуждение

Образцы с термодиффузионным покрытием имеют серый цвет и шероховатую поверхность, металлический блеск отсутствует, покрытие равномерно распределено по всей поверхности, включая ребра (рис. 1).

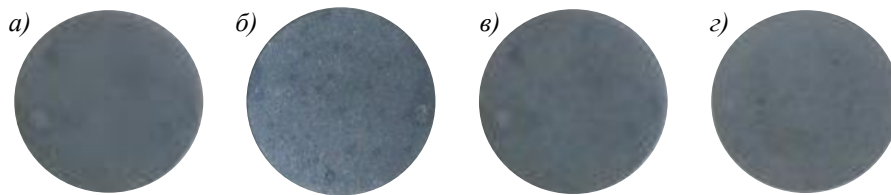


Рис. 1. Внешний вид образцов из стали 45 с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 380 (а, б) и 450 °С (в, з), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, з)

Согласно полученным при исследовании микроструктуры данным, покрытие имеет слоистую структуру толщиной ~45 мкм. В зависимости от состава порошковой смеси и режима термообработки варьируются толщина, структура и состав покрытия (рис. 2).

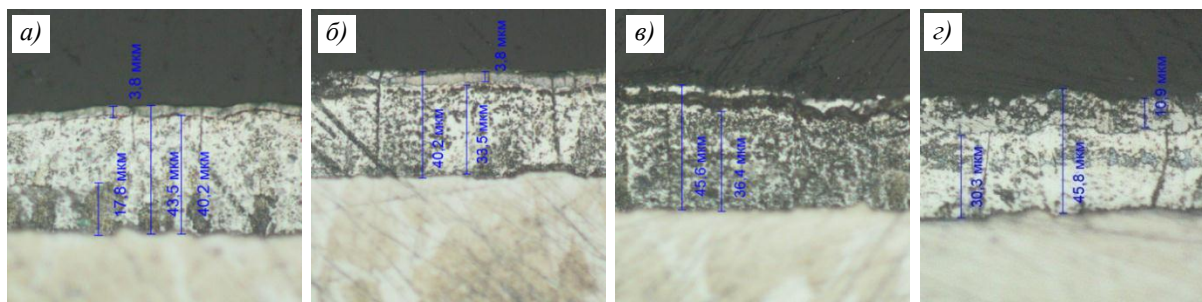


Рис. 2. Микроструктуры образцов из стали 45 с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, з), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, з)

На всех образцах четко прослеживается слоистое строение покрытия – на границе подложки и покрытия обнаружена тонкая прослойка фазы, согласно работам [8, 15, 23], представляющая собой гамма-фазу, содержащую 75 % (атомн.) цинка и 25 % (атомн.) железа. Средний, более протяженный и неоднородный слой представлен преимущественно сплавом на основе цинка и имеет столбчатую структуру. Внешний, относительно тонкий слой представлен сплавом на основе алюминия.

С помощью метода энергодисперсионного рентгеновского микроанализа получены карты распределения элементов в разрезе шлифа покрытия, которые подтверждают сделанные ранее предположения о составе термодиффузионного покрытия (рис. 3).

Анализ карт распределения элементов показал, что термодиффузионное покрытие, сформированное при температуре 450 °С, имеет четко выраженные зоны (слои) с наличием прилегающего к подложке слоя на основе цинка и внешнего слоя на основе алюминия. Содержание алюминия в цинковом слое пренебрежимо мало, как и содержание цинка в слое на основе алюминия. Содержание железа больше во внешнем слое покрытия (на основе алюминия), чем в прилегающем к подложке слое покрытия на основе цинка. Покрытия, сформированные при температуре 380 °С, не имеют четко выраженных протяженных зон (слоев), обогащенных алюминием, и представляют собой покрытие на основе цинка, содержащее небольшое количество алюминия на внешней поверхности.

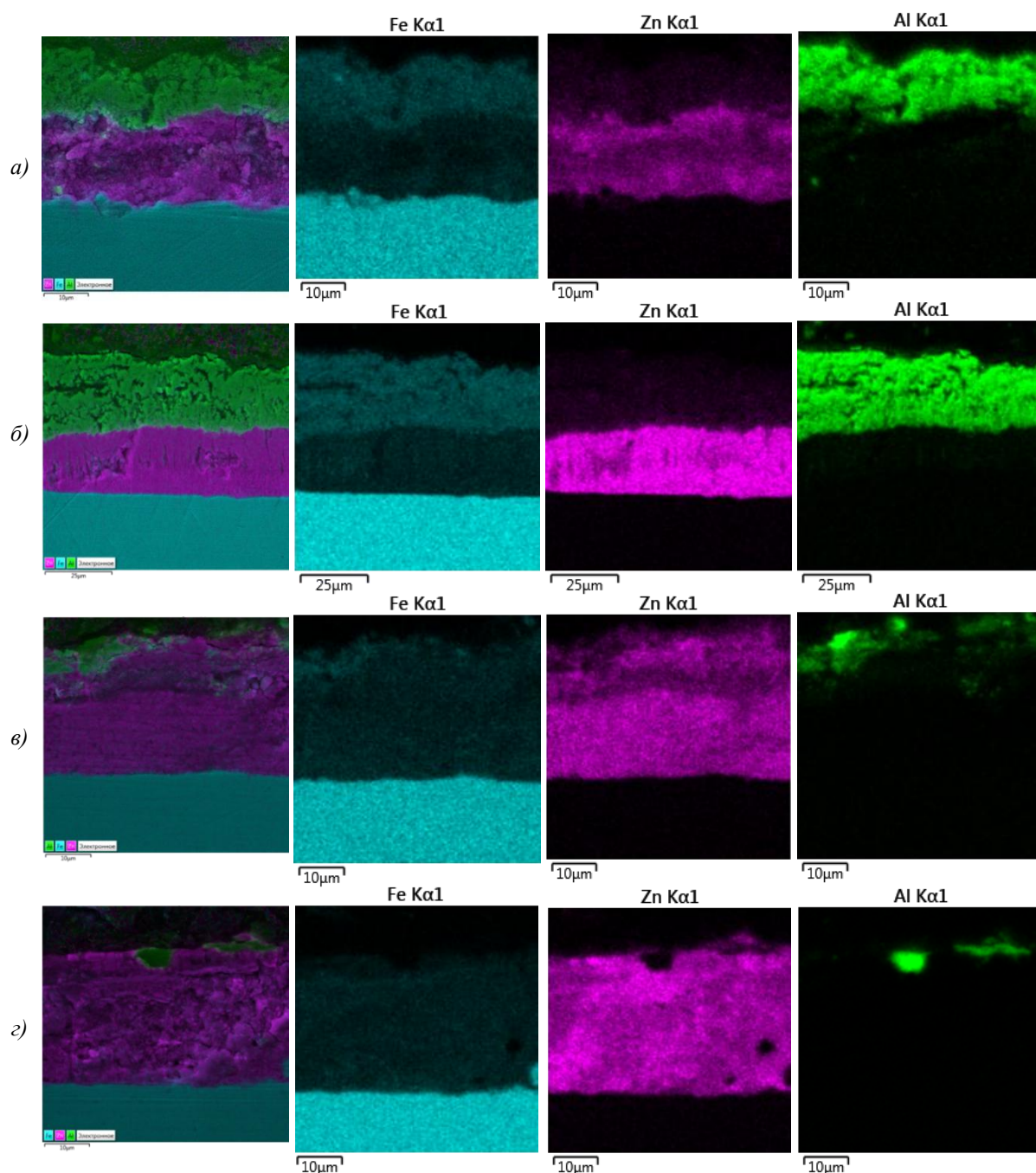


Рис. 3. Карты распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, г), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, г)

Линейные профили распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием (с различными составом порошковой смеси и продолжительностью термообработки) позволили количественно охарактеризовать наблюдаемые при картировании явления (рис. 4). Так, показано, что толщина слоя на основе цинка во всех рассмотренных случаях находится в пределах 20–25 мкм. Слой на основе алюминия наиболее выражен для образцов, обработанных при температуре 450 °С, его толщина колеблется от единиц до нескольких десятков микрометров. Содержание железа в слое на основе цинка изменяется в пределах 18–20 % (атомн.) и повышается в слое на основе алюминия до 20–25 % (атомн.).

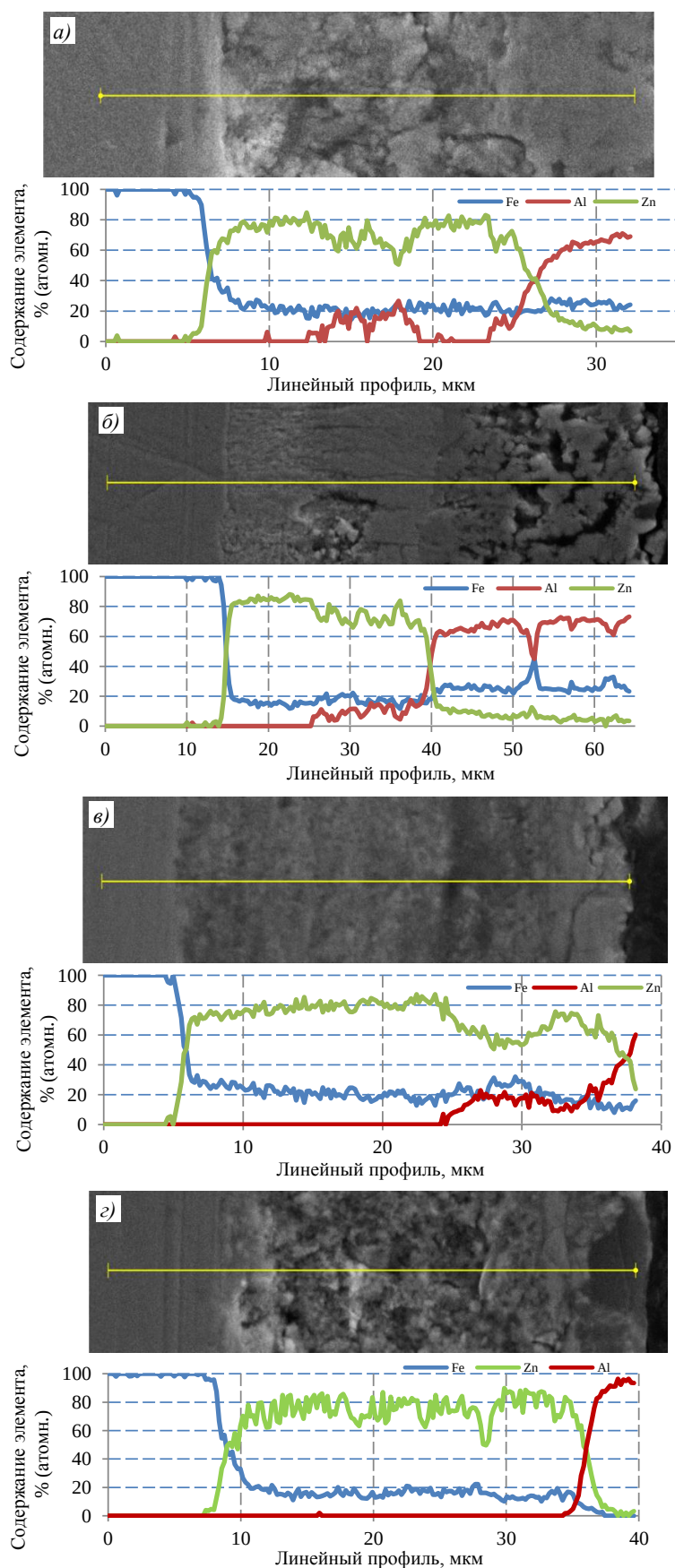


Рис. 4. Линейные профили распределения элементов в образцах с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 450 (а, б) и 380 °С (в, г), из смеси 1 (а, в) и 2 (б, г)

Анализ линейных профилей показал еще одну особенность – в покрытии, полученном при температуре 450 °С (рис. 4, а, б), в слое на основе цинка можно выделить две различные по химическому составу зоны. Первая – прилегает непосредственно к подложке и представляет собой двухкомпонентный сплав, содержащий ~80 % цинка и ~20 % железа; вторая – дополнительно содержит алюминий и имеет следующий состав, % (атомн.): 10 – алюминий, 70 – цинк, 20 – железо. Слой на основе алюминия содержит ~70 % (атомн.) алюминия, ~5 % (атомн.) цинка и ~25 % (атомн.) железа.

В покрытиях, полученных после обработки при температуре 380 °С (рис. 4, в, г), в основном представлен слой на основе цинка, содержащий ~20 % (атомн.) железа. Количество алюминия в наружном слое не превышает 20 % (атомн.).

Для оценки коррозионной стойкости покрытий проведены электрохимические измерения методом линейной вольтамперометрии [23]. Полученные результаты представлены на рис. 5.

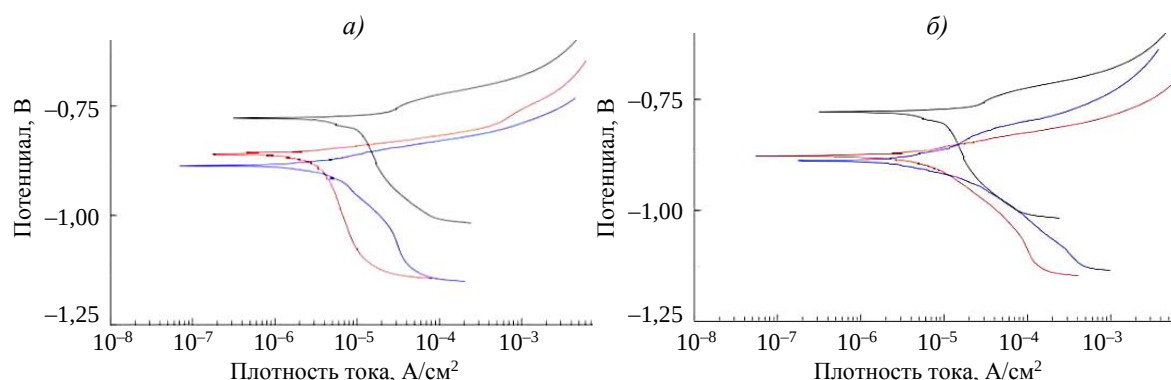


Рис. 5. Кривые, полученные методом линейной вольтамперометрии, для образцов с термодиффузионным покрытием, нанесенным при температурах 380 (а) и 450 °С (б), из смеси 1 (—) и 2 (—) в сравнении с гальваническим кадмием (—)

Для всех покрытий характерен потенциал свободной коррозии на уровне 0,9 В, что свидетельствует о более низкой коррозионной стойкости термодиффузионных покрытий в сравнении с кадмиевым покрытием (~0,8 В). Плотность тока коррозии для рассмотренных покрытий находится на одном уровне (~ $5 \cdot 10^{-6}$ А/см²), незначительно и нехарактерно различается в зависимости от состава покрытия и режима термообработки. Для кадмиевого покрытия плотность тока коррозии составляет ~ $9 \cdot 10^{-5}$ А/см². Таким образом, кадмиевое покрытие более стойкое, чем термодиффузионное, так как большее значение имеют продукты коррозии, которые могут защитить материал от дальнейшего разрушения. Более положительный потенциал кадмиевого покрытия при скорости коррозии (оцениваемой по плотности тока), сопоставимой с показателями термодиффузионных покрытий, подтверждает его высокую коррозионную стойкость. Однако менее токсичные цинк и алюминий, использованные для нанесения термодиффузионного покрытия, показывают близкий к кадмию результат.

Кроме того, следует помнить о слоистой структуре термодиффузионных покрытий, сформированных при температуре 450 °С. Коррозионную стойкость основных и промежуточных слоев, представленных фазами различного состава, невозможно исследовать приведенным методом. Однако такая структура будет влиять на общую коррозионную стойкость. При этом покрытия, сформированные при температуре 380 °С, в составе которых содержится ~20 % (атомн.) алюминия в цинковой матрице, будут корродировать по классическому для сплавов типу – избирательно. Какое покрытие

(сформированное при температуре 450 или 380 °С) будет наиболее стойким, можно будет установить только после исследования общей коррозии путем проведения сравнительных испытаний в камере соляного тумана или в натуральных условиях.

Заключения

Исследовано влияние температуры и продолжительности термообработки на формирование диффузионного алюминий-цинкового покрытия на стали 45.

Согласно полученным данным, на образцах с термодиффузионным покрытием прослеживается слоистая (толщиной ~45 мкм) структура: на границе подложки и покрытия выявлена тонкая прослойка гамма-фазы, которая включает 75 % (атомн.) цинка и 25 % (атомн.) железа. Центральный слой представлен в основном сплавом на основе цинка, внешний – сплавом на основе алюминия. При этом содержание железа существенно больше во внешнем слое на основе алюминия, чем в среднем слое на основе цинка. Из данных карт распределения элементов видно, что термодиффузионное покрытие, сформированное при температуре 450 °С, имеет более насыщенный алюминием внешний слой, чем образцы, обработанные при температуре 380 °С. Значительного влияния содержания алюминия в порошковой смеси на состав или толщину слоев покрытий не установлено.

Из результатов линейной вольтамперометрии следует, что образцы с термодиффузионным покрытием, сформированным при температурах 380 и 450 °С, имеют высокую коррозионную стойкость в среде 3%-ного раствора хлорида натрия и близки по этому показателю к традиционно используемому гальваническому кадмиевому покрытию. В данном случае коррозионная стойкость покрытия не зависит от содержания алюминия в порошковой смеси, что объясняется формированием идентичных структур в покрытии со схожим химическим составом поверхностного слоя, который оказывает основное влияние на результаты электрохимических измерений.

Таким образом, обработка при температуре 450 °С будет обеспечивать достаточную коррозионную стойкость алюминий-цинкового покрытия, близкую к показателю кадмиевого гальванического покрытия. В перспективе это позволит рассмотреть замену кадмиевого покрытия менее токсичным термодиффузионным алюминий-цинковым.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. № 11. С. 16–21.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2. С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
4. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
5. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.

6. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
7. Каблов Е.Н., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В., Виноградов С.С. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей // *Сталь*. 2016. № 6. С. 70–81.
8. Проскурин Е.В., Горбунов Н.С. Диффузионные цинковые покрытия. М.: Металлургия, 1972. 248 с.
9. Каблов Е.Н., Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на характеристики алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
10. Астлюхина А.С., Пикалов Е.С. Характеристика современных методов нанесения защитных цинковых покрытий // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 11-1. С. 11–14.
11. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Прагер С.М., Малинин Р.Ю. К вопросу о разработке универсальной расчетной методики оценки деградации оборотных металлических порошковых материалов в зависимости от цикличности использования в процессе селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
12. Состав порошковой смеси для термодиффузионной обработки стальных изделий, способ термодиффузионной обработки стальных изделий: пат. RU2685841C1 Рос. Федерация; заявл. 15.10.18; опубл. 23.04.19.
13. Жигунов К.В. Общие закономерности процессов диффузионного насыщения при химико-термической обработке // *Машиностроитель*. 2004. № 1. С. 26–27.
14. Shen T.H., Tsai C.Y., Lin C.S. Growth behavior and properties of Zn–Al pack cementation coatings on carbon steels // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 306. P. 455–461.
15. Mahdavi A. Corrosion Resistance of Boronized, Aluminized, and Chromized Thermal Diffusion-Coated Steels in Simulated High-Temperature Recovery Boiler Conditions // *Coatings*. 2018. Vol. 8 (8). P. 257.
16. Sun A., Xiaoming S., Li H., Wang Q. Interface microstructure and mechanical properties of zinc–aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy // *Materials & Design*. 2015. Vol. 1004–1005. P. 154–157.
17. Способ диффузионного цинкования металлических деталей: пат. RU2593252C2 Рос. Федерация; заявл. 29.12.14; опубл. 10.08.16.
18. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления; пер. с нем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 268 с.
19. Елисеев Э.А., Севальнев Г.С., Дорошенко А.В., Дружинина М.Э. Влияние температурно-временных параметров длительных выдержек на превращения в конструкционных сталях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.
20. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings // *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Elsevier Ltd., 2015. P. 737–750.
21. Xue Q., Sun C., Yu J. et al. Microstructure evolution of a Zn–Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 699. P. 1012–1021.
22. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. М.: Металлургия, 1981. 120 с.
23. Хмелева К.М., Заварзин С.В., Козлов И.А., Лонский С.Л. Влияние термической обработки на коррозионные свойства алюмоцинковых покрытий, полученных методом ХГН // *Климат-2022: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 171–192.*

References

1. Kablov E.N. Corrosion or life. *Nauka i zhizn*, 2012, no. 11, pp. 16–21.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V. Protection against corrosion of carbon steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
5. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
6. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
7. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Advanced Coatings for Corrosion Protection of Carbon Steels. *Stal*, 2016, no. 6, pp. 70–81.
8. Proskurin E.V., Gorbunov N.S. *Diffusion Zinc Coatings*. Moscow: Metallurgiya, 1972, 248 p.
9. Kablov E.N., Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskii S.L. The effect of heat treatment on the characteristics of aluminium-zinc coatings obtained by the cold spray method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 07, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-78-91.
10. Astalyukhina A.S., Pikalov E.S. Characteristics of modern methods of applying protective zinc coatings. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2015, no. 11-1, pp. 11–14.
11. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Prager S.M., Malinin R.Yu. On the development of a universal calculation method for assessing the degradation of recycled metal powder materials, depending on the cyclicity of use in the selective laser melting process. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-3-11.
12. *Composition of powder mixture for thermal diffusion treatment of steel products, method of thermal diffusion treatment of steel products*: pat. RU2685841C1 Rus. Federation; appl. 15.10.18; publ. 23.04.19.
13. Zhigunov K.V. General patterns of diffusion saturation processes during thermochemical treatment. *Mashinostroitel*, 2004, no. 1, pp. 26–27.
14. Shen T.H., Tsai C.Y., Lin C.S. Growth behavior and properties of Zn–Al pack cementation coatings on carbon steels. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 306, pp. 455–461.
15. Mahdavi A. Corrosion Resistance of Boronized, Aluminized, and Chromized Thermal Diffusion-Coated Steels in Simulated High-Temperature Recovery Boiler Conditions. *Coatings*, 2018, vol. 8 (8), p. 257.
16. Sun A., Xiaoming S., Li H., Wang Q. Interface microstructure and mechanical properties of zinc–aluminum thermal diffusion coating on AZ31 magnesium alloy. *Materials & Design*, 2015, vol. 1004–1005, pp. 154–157.
17. *Method of diffusion galvanizing of metal parts*: pat. RU2593252C2 Rus. Federation; appl. 29.12.14; publ. 10.08.16.
18. Beckert M., Klemm H. *Methods of metallographic etching*. Trans. from Germ. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya, 1988, 268 p.
19. Eliseev E.A., Sevalnev G.S., Doroshenko A.V., Druzhinina M.E. Influence of time-temperature parameters of long-duration exposure on transformations in structural steels (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 07.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-15-23.

20. Natrup F., Graf W. Sherardizing: corrosion protection of steels by zinc diffusion coatings. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Elsevier Ltd., 2015, pp. 737–750.
21. Xue Q., Sun C., Yu J. et al. Microstructure evolution of a Zn-Al coating co-deposited on low-carbon steel by pack cementation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 699, pp. 1012–1021.
22. Kovalenko V.S. *Metallographic reagents*: handbook. Moscow: Metallurgiya, 1981, 120 p.
23. Khmeleva K.M., Zavarzin S.V., Kozlov I.A., Lonskiy S.L. *Effect of heat treatment on the corrosion properties of aluminum-zinc coatings obtained by the CGD method*. Climate-2022: modern approaches to assessing the impact of external factors on materials and complex technical systems: Proc. VII All-Rus. sc. and tech. conf. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022, pp. 171–192.

Информация об авторах

Софронова Дарья Андреевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ярошевская Виктория Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кольцова Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лонский Станислав Леонардович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Князев Андрей Вадимович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Darya A. Sofronova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victoria N. Yaroshevskaya, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Stanislav L. Lonskii, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.05.2025.
The article was submitted 12.05.2025; approved and accepted for publication after reviewing 13.05.2025.

Научная статья

УДК 620.197.6:004.93

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ*А.Б. Лаптев¹, Г.Г. Матишов², А.В. Щербакова³, И.Г. Лапшин³, И.М. Губайдуллин³*

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

²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия; ssc-ras@ssc-ras.ru

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия; info@rusoil.net

Аннотация. Вопросы повышения точности визуального контроля коррозии являются актуальными и не решены до настоящего времени. Разработаны основные подходы к количественной оценке коррозионных поражений металла под лакокрасочным покрытием. Подходы, предусматривающие фотосъемку с разрешением более 30 мегапикселей и обучение программы на образцах без проявления и с проявлением очагов коррозии с использованием современных технологий компьютерного зрения, нейросетевых архитектур и методов обработки изображений, позволят автоматизировать и повысить точность количественной оценки повреждений лакокрасочных покрытий.

Ключевые слова: лакокрасочное покрытие, компьютерное зрение, коррозия, ржавчина, оценка коррозионных поражений, сталь, нейросеть

Для цитирования: Лаптев А.Б., Матишов Г.Г., Щербакова А.В., Лапшин И.Г., Губайдуллин И.М. Разработка метода количественной оценки повреждения лакокрасочных покрытий с использованием компьютерного распознавания изображений // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148.

Scientific article

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR QUANTITATIVE ASSESSMENT OF PAINT COATINGS DAMAGE USING COMPUTER IMAGE RECOGNITION*A.B. Laptev¹, G.G. Matishov², A.V. Shcherbakova³, I.G. Lapshin³, I.M. Gubaidullin³*

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

²Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia; ssc-ras@ssc-ras.ru

³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia; info@rusoil.net

Abstract. The issues of improving the accuracy of visual corrosion monitoring are relevant and are not yet fully resolved. The main approaches to the quantitative assessment of corrosion damage to metal under paint coatings have been developed. The methods involving photography with a resolution over 30 megapixels and training the program on samples both without and with visible corrosion foci using modern computer vision technologies, neural network architectures and image processing methods will make it possible to automate and improve the accuracy of quantitative assessment of paint coatings damage.

Keywords: paintwork, computer vision, corrosion, rust, assessment of corrosion damage, steel, neural network

For citation: Laptev A.B., Matishov G.G., Shcherbakova A.V., Lapshin I.G., Gubaidullin I.M. Development of a method for quantitative assessment of paint coatings damage using computer image recognition. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-137-148.

Введение

Защитное действие лакокрасочных покрытий (ЛКП) в первую очередь оценивают визуально. На основании полученных данных принимают решение о дальнейшем исследовании покрытия более точными методами. При этом визуальная оценка во многом зависит от личности оценивающего, освещения, цвета ЛКП и материала подложки. Например, на подложке из алюминиевого или титанового сплава не образуются ярко выраженные рыжие пятна, как на углеродистой стали. Поэтому визуальная оценка возможна только при значительном отличии цвета ЛКП от цвета образующихся продуктов коррозии [1].

Одним из распространенных методов оценки коррозии материалов являются металлографические исследования. Стандартные исследования, такие как определение площади корродированной поверхности, глубины питтингов и межкристаллитной коррозии, могут быть значительно расширены с использованием современных методов обработки изображений [2]. С помощью компьютерного зрения можно определить тип коррозионных поражений [3, 4], выявить локальную [5, 6] и общую коррозию металлов и сплавов [7], оценить профиль коррозионных поражений и отложений [8, 9].

Коррозия по-прежнему остается самой серьезной проблемой, с которой сталкиваются исследователи и промышленность, в том числе при эксплуатации судов, трубопроводов сточных вод, нефте- и газопроводов [10, 11].

В работе [12] для тестирования различных условий окружающей среды предлагается использовать множество подходов или параметров для обнаружения, оценки и прогнозирования коррозии. Своевременный мониторинг с использованием компьютерного зрения и методов обработки изображений можно реализовать с помощью нейронных, беспроводных и передовых сенсорных сетей, больших объемов данных, лазерного и ультразвукового сканирования.

Компьютерное зрение предполагает разработку алгоритмов и методов, позволяющих машинам моделировать или воспроизводить зрение человека в результате машинного обучения. Машина или компьютер обладают способностью воспринимать и анализировать входные визуальные данные, наиболее распространенными среди которых являются изображения и видеоролики.

Обработка изображений – один из многих методов, используемых в компьютерном зрении. Другие методы, такие как сегментация экземпляров, семантическая сегментация, выделение, обнаружение и идентификация объектов, классификация изображений, также важны и широко используются в компьютерном зрении. Использование компьютерного зрения позволяет идентифицировать и классифицировать области коррозии на изображениях наряду с другими методами машинного обучения, такими как конвективная нейронная сеть (CNN) и генетический алгоритм. Это неразрушающий тест, которым можно управлять на расстоянии.

Обработка изображений включает настройку их различных параметров с целью улучшения и трансформации для повышения четкости и качества. Изображения можно преобразовать с использованием множества методов, таких как растягивание, сглаживание, повышение резкости, устранение размытия, фильтрация, закрашивание, восстановление, сжатие и сегментация. Цифровые изображения содержат определенные значения и местоположения, которые представлены пикселями, визуальными компонентами и другими элементами. Каждое из изображений состоит из строк и столбцов пикселей.

Двумерный сигнал обрабатывается в соответствии с конкретной задачей. Входными данными для обработки являются изображения и видео.

Выходными данными являются преобразованные входные изображения и видео. Обработка изображений, рассматриваемая как часть компьютерного зрения, используется для сегментации, фильтрации, повышения резкости и увеличения объема области, поврежденной коррозией. Другие способы обработки изображений включают коррекцию освещенности, подавление шума, повышение контрастности и изменение масштаба изображения.

Процессы компьютерного зрения и обработки изображений для поиска очагов и идентификации типа и интенсивности коррозии включают пять основных этапов: получение, предварительная обработка, сегментация изображения, выделение признаков и классификация изображения.

Реализация сложных методов, таких как прогнозное моделирование, является одной из наиболее актуальных проблем и частой темой исследований в области компьютерного зрения и обработки изображений.

Компьютерное зрение и обработка изображений позволяют получить представление о состоянии материалов. Эти подходы удобны для использования в промышленных и исследовательских целях, поскольку таким образом коррозию можно обнаружить, оценить, проанализировать и поддерживать изделие в рабочем состоянии с помощью дистанционного мониторинга. При этом компоненты, материалы и оборудование, подверженные коррозии, не выводятся из эксплуатации, соответственно производительность не снижается. Кроме того, с помощью этих методов можно определить степень повреждения облицовки, характеристики деформации и видимые внутренние повреждения.

Использование изображений с высоким разрешением позволяет получить всестороннюю оценку поврежденного коррозией участка. Автоматизированный анализ проводится на узлах или кромках, что позволяет снизить затраты на передачу данных и увеличить скорость обнаружения коррозии. Цифровые измерения поврежденного участка можно осуществить намного быстрее, чем получить данные исследований, проведенных инструментальными методами.

В работе [13] представлен метод автоматического обнаружения и анализа коррозионных пятен на корпусах морских судов. В предлагаемом методе несколько снимков с разных позиций и углов обзора вокруг судна регистрируются одновременно, образуя полное трехмерное облако точек. Значения R, G, B (интенсивность красного, зеленого и синего компонентов цвета соответственно), связанные с каждым сканированием и полученные с помощью встроенной камеры, преобразуются в пространство HSV (Hue, Saturation, Value – оттенок, насыщенность, значение), чтобы отделить цветовую составляющую, зависящую от освещенности и интенсивности. С помощью этого цветового компонента в выбранной зоне автоматически обнаруживаются различные дефекты поверхности, такие как коррозионные пятна различной формы и размера, которые затем анализируются и оцениваются количественно, что помогает лучше планировать и оценивать стоимость ремонта и технического обслуживания.

Выполнены исследования с проведением анализа цвета, но уже с применением классификации, основанной на количестве пикселей, содержащих определенные красные компоненты, и компьютерной программы, написанной на языке Python, библиотеки OpenCV для вычисления и классификации изображений, а также мощной платформы Caffe [14, 15].

Аналогичным образом, но с получением снимков посредством облета объекта квадрокоптером [16] и с помощью смартфона [17] реализована идея компьютерного зрения. В работе [18] с использованием автоматизированной системы распознавания изображений проведен мониторинг коррозионного состояния моста. Показано, что вероятность успешного определения ржавых участков, требующих очистки и восстановления ЛКП, достигла 97,48 %. Продолжительность обработки 200 изображений составила 23 с, средняя продолжительность обработки одного изображения: 0,115 с.

Для изучения поведения питтинговой коррозии на ранней стадии использован анализ изображений, основанный на дискретном вейвлет-пакетном преобразовании и фракталах [19].

Кроме того, сочетание компьютерного зрения, картографирования микротрещин, сканирующей электронной микроскопии и нейтронной томографии можно использовать в качестве нового метода обнаружения микробиологической коррозии. До сих пор не существует стандартного подхода к оценке такого вида коррозии [20, 21].

Низкое качество снимков коррозии из-за наличия шумов, помех, искажений, засветки и стабилизации является основной проблемой при использовании компьютерного зрения и методов обработки изображений. Настоятельно рекомендуется применять автоматизированный сбор изображений, когда все методы предварительной обработки встроены в оборудование, что позволяет получить изображение высокого качества. С другой стороны, большинство разработанных методов компьютерного зрения и обработки изображений реализованы на простых кривых и плоских поверхностях. Рекомендуется учитывать и другие сложные конструкции и форму, типичные для тяжелых машин, корпусов судов, мостов и т. д. Кроме того, анализ тенденций можно использовать для прогнозирования прогрессирования коррозии или наростов на материалах [22, 23]. Модель прогнозирования можно применять при проведении технического обслуживания с целью создания автоматизированной системы контроля коррозии.

При защите конструкций с применением ЛКП важным является не только процесс развивающейся коррозии, но и изменение состояния самого покрытия [24, 25]. В конечном итоге изменение покрытия приводит к развитию очагов коррозии, для предотвращения появления которых необходимо анализировать ряд показателей в соответствии с ГОСТ 9.407–2015: изменение блеска (поматовение) и цвета, грязеудержание, меление, растрескивание, выветривание, отслаивание, образование пузырей (вздутие).

Цель исследования – разработка метода автоматизированного анализа изображений для оценки повреждений ЛКП и степени коррозионных поражений поверхности.

Материалы и методы

В соответствии с научно-исследовательской работой «Изучение эмиссии и токсичности микрочастиц пластика из лакокрасочных покрытий» выполнена экспозиция образцов ЛКП на трех климатических площадках: в Ростовской области, Краснодарском крае и Москве.

Для проведения испытаний использованы ЛКП на основе грунта ГФ-21:

- эмаль акрил-полиуретановая белая;
- эмаль алкидная ПФ-115 голубая;
- эмаль алкидная 3 в 1 по ржавчине коричневая.

Покрытия наносили на специально подготовленные пластины из стали Ст3.

На рис. 1 приведен внешний вид стенда, на рис. 2 – появление первых коррозионных поражений на образцах с ЛКП.



Рис. 1. Стенд с образцами лакокрасочных покрытий на площадке Южного научного центра РАН в с. Кагальник



Рис. 2. Первые проявления коррозии на образцах с акрил-полиуретановой эмалью

Через 2 мес. экспозиции некоторые ЛКП начинают трескаться и отслаиваться. Такие покрытия необходимо вовремя заменять устойчивыми к условиям данного климата ЛКП с применением современных технологий подготовки поверхности и нанесения. Это приведет к снижению эмиссии микрочастиц ЛКП и значительно улучшит экологическую обстановку в РФ.

Для фотосъемки использована зеркальная фотокамера с возможностью смены объективов (например, Canon EOS 5D Mark IV) с макрообъективом с фокусным расстоянием 100 мм для получения высококачественного изображения повреждений ЛКП размером <1 мм. Разрешение матрицы фотокамеры составило 30 мегапикселей (обычно 6720×4480 пикселей).

Съемку проводили в стационарных условиях на расстоянии 50 ± 5 см от образца. Для обеспечения однородного освещения использовали два боковых источника мягкого света и переменный центральный свет, что позволило избежать теней и перекрытий.

Поиск и распознавание коррозионных пятен на фотографиях проводили с использованием программного обеспечения для обработки изображений (типа MATLAB или OpenCV) с применением алгоритмов выявления контуров и сегментации изображения. Для обработки данных использовали статистические методы оценки значимости и корреляции между факторами (например, толщина ЛКП, продолжительность воздействия коррозионной среды и т. д.). Эта структура позволяет последовательно проанализировать процесс исследования с фокусом на стали с ЛКП и выявить коррозионные повреждения.

Результаты и обсуждение

На поверхности стали выделяют три вида коррозии (сплошная коррозия, язвы и пятна), каждый из которых по-разному влияет на степень повреждения поверхности. Для всех типов коррозии есть общие параметры: распределение по площади (измеряется с помощью алгоритмов компьютерного зрения по фотографиям поверхности) и глубине (определяется с помощью изображений, сделанных под микроскопом).

На рис. 3 приведены фотография образца с акрил-полиуретановым покрытием с коррозионным поражением и диаграмма распределения цветов на его поверхности. Посредством разработанной программы выполнено распознавание изображений и определены 12 основных цветов.

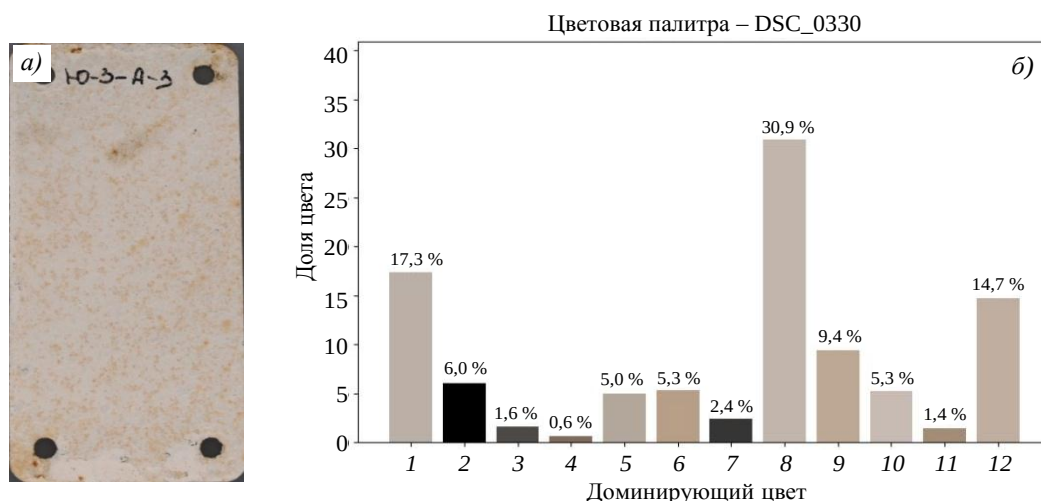


Рис. 3. Образец с акрил-полиуретановым покрытием (а) и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности (б)

На рис. 3, б представлено распределение доминирующих цветных оттенков в изображении. Ось X содержит доминирующие цвета. Обозначения на оси X являются номером цвета по направлению сканирования. Ось Y показывает процентное соотношение пикселей (доля от всей площади исследуемой поверхности, относящаяся к каждому доминирующему цвету).

Гистограмма позволяет быстро оценить, какие цвета являются наиболее распространенными в изображении и их относительное преобладание.

Для численного представления данных сформирована табл. 1. Она содержит информацию о доминирующих цветах, найденных в изображении с использованием алгоритма кластеризации KMeans. Каждая строка в таблице представляет один доминирующий цвет. Значения R, G и B изменяются от 0 до 255 и отражают интенсивность красного, зеленого и синего компонентов цвета соответственно. Доля цвета, т. е. процентное отношение пикселей данного доминирующего цвета к общему количеству пикселей в изображении, позволяет понять, насколько каждый доминирующий цвет преобладает.

Таким образом, для цветного анализа получены структурированные данные в табличном виде и наглядное графическое представление, что позволяет детально изучить и понять распределение доминирующих цветовых оттенков в изображении.

Таблица 1

**Распределение цветов и их характеристика
для образца с акрил-полиуретановым покрытием**

Условный номер цвета	R	G	B	R – B	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	187	176	168	19	755624	17,35
2	0	0	0	0	263396	6,05
3	77	73	71	6	67627	1,55
4	127	108	94	33	25783	0,59
5	179	166	155	24	217375	4,99
6	182	158	135	47	232534	5,34
7	55	52	52	3	104758	2,40
8	193	181	172	21	1347411	30,93
9	189	167	149	40	408446	9,38
10	200	187	179	21	228741	5,25
11	163	141	119	44	62277	1,43
12	192	174	160	32	642348	14,75

Из рис. 3, а следует, что акрил-полиуретановое покрытие имеет низкую защитную способность, на всей поверхности образца видны проявления коррозии стали – ржавчина. По диаграмме на рис. 3, б можно оценить количество ярко выраженных проявлений ржавчины и долю поверхности, загрязненной продуктами коррозии. При анализе полученных данных по разнице интенсивности красного и синего цветов $R - B$, которая для базового цвета 8 составляет 21, отклонения в красную область являются проявлениями коррозии – ржавчины. Например, $R - B = 47$ для цвета 6, $R - B = 40$ – для цвета 9 (табл. 1). Доля площади поверхности, загрязненной ржавчиной ($R - B > 21$), составляет 36,48 %.

На рис. 4 и 5 приведены фотографии образцов с коричневым и голубым алкидным ЛКП и диаграммы распределения цветов на их поверхности. Значения интенсивности красного, зеленого и синего цветов, количество пикселей, занятых данным цветом, и доля цвета приведены в табл. 2 и 3.

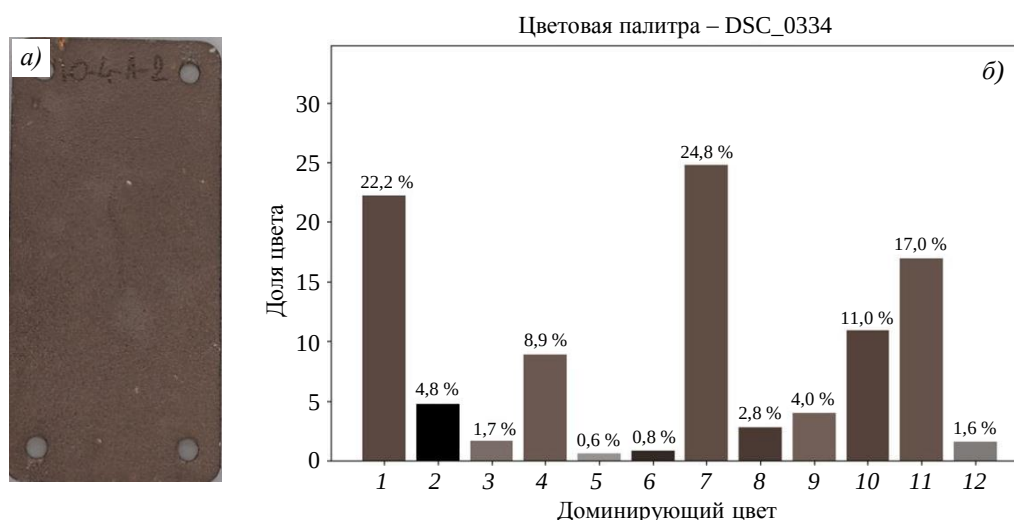


Рис. 4. Образец с коричневым алкидным покрытием (а) и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности (б)

Таблица 2

**Распределение цветов и их характеристика
для образца с алкидным покрытием коричневого цвета**

Условный номер цвета	R	G	B	$R - B$	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	91	72	64	27	953734	22,23
2	0	0	0	0	203908	4,75
3	122	108	102	20	70947	1,65
4	107	88	80	27	379940	8,85
5	151	145	144	7	25719	0,60
6	52	41	37	15	34196	0,80
7	96	77	68	28	1064210	24,80
8	74	58	51	23	120972	2,82
9	114	96	88	26	172796	4,03
10	85	67	59	26	470085	10,95
11	101	82	74	27	728023	16,97
12	128	122	121	7	66684	1,55

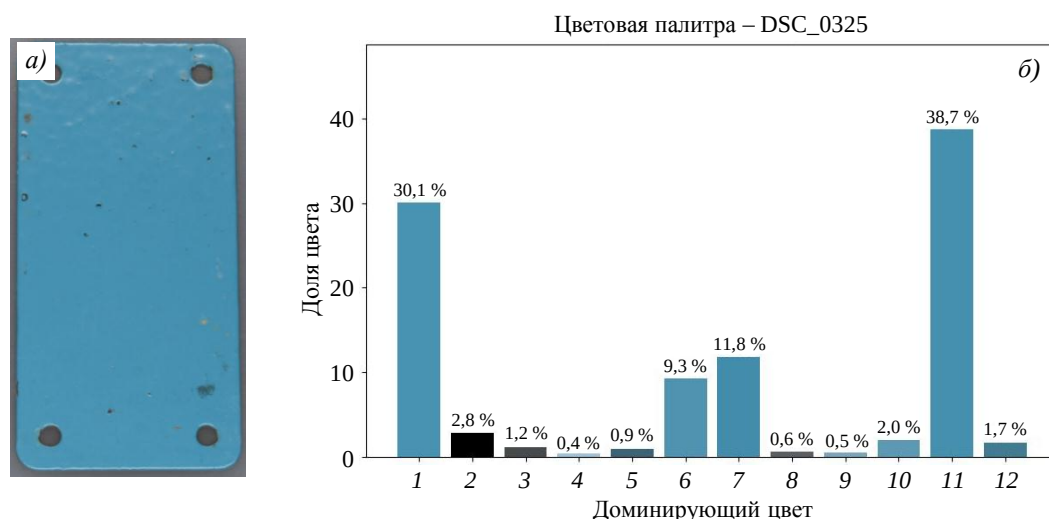


Рис. 5. Образец с голубым алкидным покрытием и диаграмма распределения 12 основных цветов на его поверхности

Таблица 3

**Распределение цветов и их характеристика
для образца с алкидным покрытием голубого цвета**

Условный номер цвета	R	G	B	R – B	Количество пикселей	Доля цвета, %
1	72	146	178	–106	1245378	30,05
2	0	0	0	0	116272	2,80
3	70	76	78	–8	48692	1,17
4	157	194	213	–56	16342	0,39
5	59	100	118	–59	38390	0,93
6	80	147	176	–96	384416	9,28
7	67	140	171	–104	487969	11,78
8	91	95	97	–6	24303	0,59
9	121	168	189	–68	21931	0,53
10	94	153	179	–85	84687	2,04
11	69	143	175	–106	1605513	38,75
12	66	124	148	–82	69656	1,68

Из рис. 4 и данных табл. 2 видно, что для образца с коричневым алкидным покрытием цвету ржавчины в наибольшей степени соответствует цвет 6, площадь поверхности, пораженной коррозией, составляет 0,6 %.

Согласно данным табл. 3, для образца с голубым алкидным покрытием $R - B \leq 0$, т. е. проявления ржавчины на поверхности отсутствуют. Образец выдержал испытания и ЛКП устойчиво к воздействию окружающей среды.

Заключения

Вопросы повышения точности визуального контроля коррозии являются актуальными и не решены до настоящего времени. Разработаны подходы к количественной оценке распространения коррозии на стальных деталях, покрытых ЛКП.

При оценке стойкости ЛКП к воздействию окружающей среды должны быть сделаны фотографии деталей или образцов с разрешением не менее 30 мегапикселей

(обычно 6720×4480 пикселей), что обеспечивает высокую детализацию для последующей обработки изображений с помощью методов компьютерного зрения и машинного обучения.

Необходимо проводить обучение системы компьютерного зрения на обучающем датасете, включающем образцы без проявлений коррозии и с очагами коррозии. Поскольку ЛКП может иметь различную цветовую гамму, рекомендуется выделять цветовые признаки, в частности определять значение разности $R - B$, что позволяет автоматизировать обнаружение ржавчины с использованием методов цветовой сегментации, кластеризации и обучения моделей на основе алгоритмов машинного обучения, например Support Vector Machine (метод опорных векторов), Random Forest («случайный лес»), CNN.

При исследовании повреждений ЛКП, нанесенных на подложки из алюминия, титана, нержавеющей стали и других материалов, продукты коррозии которых не изменяют цвет ЛКП, подход необходимо скорректировать. Например, для оценки трещин рекомендуется учитывать их цвет и текстуру, а для выявления вздутий необходимо использовать одностороннее освещение с тенью для выявления изменений рельефа поверхности с применением методов структурированного света, 3D-моделирования и анализа глубинных карт.

Данные подходы с использованием современных технологий компьютерного зрения, нейросетевых архитектур и методов обработки изображений позволят автоматизировать и повысить точность количественной оценки повреждений ЛКП. В перспективе планируется внедрение систем реального времени (real-time processing) с использованием глубоких нейронных сетей, таких как YOLO, EfficientDet или Mask R-CNN, для распознавания дефектов на изображениях с автоматической выдачей информации о степени повреждения, наличии коррозии и др.

Для обучения и тестирования таких моделей предполагается создание базы данных из 100–200 аннотированных образцов, что позволит получить статистическую репрезентативность и высокую точность автоматического анализа. Это обеспечит получение исчерпывающей количественной информации о состоянии ЛКП, повысит эффективность систем мониторинга и автоматизированного технического обслуживания, а также снизит риск возникновения аварийных ситуаций за счет своевременного выявления и оценки повреждений.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-528 от 24.04.2024 на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития).

Список источников

1. Кривушина А.А., Коган А.М., Старцев В.О. Сохраняемость свойств лакокрасочных покрытий после воздействия климатических факторов и микромицетов-деструкторов // Труды ВИАМ. 2024. № 7 (137). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. № 12. С. 6–18.
3. Choi K.Y., Kim S.S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing // Corrosion Science. 2005. Vol. 47. No. 1. P. 1–15.
4. Pidaparti R.M., Aghazadeh B.S., Whitfield A. et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis // Corrosion Science. 2010. Vol. 52. No. 11. P. 3661–3666.

5. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L. et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation // *Materials Science and Engineering: A*. 2002. Vol. 334. P. 298–306.
6. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Ribeiro R.B. An image analysis study of pit formation on Ti–6Al–4V // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. Vol. 341. P. 202–210.
7. Tao L., Song S., Zhang X. et al. Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminium alloys // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. No. 21. P. 6870–6874.
8. Wang S., Song S. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 385. No. 1-2. P. 377–381.
9. Виноградов С.С., Теркулова Ю.А., Курдюкова Е.А., Никифоров А.А. Износостойкие, антифрикционное и фреттингостойкое покрытие на основе Ni–B // *Труды ВИАМ*. 2015. № 1. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2.
10. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник РАН*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
11. 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.
12. Jamaludin A.A., Imran S., Mahadi Md.A. et al. Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Art. 1954. DOI: 10.3390/jmse11101954.
13. Aijazi A.K., Malaterre L., Tazir M.L. et al. Detecting and analysing corrosion spots on the hull of large marine vessels using colored 3D lidar point clouds // *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 1. P. 153–160.
14. Petricca L., Moss T., Figueroa G., Broen S. Corrosion Detection Using A.I: A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model // *Computer Science & Information Technology*. 2016. Vol. 6. P. 91–99. DOI: 10.5121/csit.2016.60608.
15. Idris S.A., Jafar F.A., Jamaludin Z., Blar N. Improvement of corrosion detection using vision system for pipeline inspection // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 761. Art. 1.
16. Ortiz A., Bonnin-Pascual F., Garcia-Fidalgo E. Visual inspection of vessels by means of a micro-aerial vehicle: an artificial neural network approach for corrosion detection // *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*. Heidelberg: Springer, 2016. 320 p.
17. Igoe D., Parisi A.V. Characterization of the corrosion of iron using a smartphone camera // *Instruments Science Technology*. 2016. Vol. 44 (2). P. 139–147. DOI: 10.1080/10739149.2015.1082484.
18. Son H., Hwang N., Kim C. Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 42. P. 13–24. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.016.
19. Alkanhal T.A. Image processing techniques applied for pitting corrosion analysis // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3 (1). P. 315–336.
20. Grengg C., Müller B., Staudinger C. et al. High-resolution optical pH imaging of concrete exposed to chemically corrosive environments // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 116. P. 231–237.
21. Лаптев А.Б., Коган А.М., Николаев Е.В. и др. Математическое моделирование процессов получения и старения полимерных композиционных материалов // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2024. Т. 69. № 1. С. 65–75. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75.
22. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулев К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 9. С. 24–31.
23. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р., Горбовец М.А. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). Ст. 12. URL: <https://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.

24. Горбовец М.А., Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 1. Требования к материалам // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
25. Горбовец М.А. Николаев Е.В., Старцев В.О. Климатические испытания материалов для Арктики. Часть 2. Требования к испытаниям // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). Ст. 12. URL: <https://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.

References

1. Krivushina A.A., Kogan A.M., Startsev V.O. Preservation of the properties of paint coatings after exposure to climatic factors and micro-mycetes-destructors. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-66-76.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Panin S.V. Corrosive aggressiveness of the coastal atmosphere. Part 1. Influencing factors (review). *Korroziya: materialy, zashchita*, 2013, no. 12, pp. 6–18.
3. Choi K.Y., Kim S.S. Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing. *Corrosion Science*, 2005, vol. 47, no. 1, pp. 1–15.
4. Pidaparti R.M., Aghazadeh B.S., Whitfield A. et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis. *Corrosion Science*, 2010, vol. 52, no. 11, pp. 3661–3666.
5. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Horovistiz A.L. et al. An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, vol. 334, pp. 298–306.
6. Codaro E.N., Nakazato R.Z., Ribeiro R.B. An image analysis study of pit formation on Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, vol. 341, pp. 202–210.
7. Tao L., Song S., Zhang X. et al. Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminium alloys. *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, no. 21, pp. 6870–6874.
8. Wang S., Song S. Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, vol. 385, no. 1–2, pp. 377–381.
9. Vinogradov S.S., Terkulova Yu.A., Kurdyukova E.A., Nikiforov A.A. Wear-proof, antifriction and fretting-resistant coating based on Ni–B. *Trudy VIAM*, 2015, no. 1, paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 01, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-2-2.
10. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
11. 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.
12. Jamaludin A.A., Imran S., Mahadi Md.A. et al. Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, art. 1954. DOI: 10.3390/jmse11101954.
13. Aijazi A.K., Malaterre L., Tazir M.L. et al. Detecting and analysing corrosion spots on the hull of large marine vessels using colored 3D lidar point clouds. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, vol. 1, pp. 153–160.
14. Petricca L., Moss T., Figueroa G., Broen S. Corrosion Detection Using A.I: A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model. *Computer Science & Information Technology*, 2016, vol. 6, pp. 91–99. DOI: 10.5121/csit.2016.60608.
15. Idris S.A., Jafar F.A., Jamaludin Z., Blar N. Improvement of corrosion detection using vision system for pipeline inspection. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 761, art. 1.
16. Ortiz A., Bonnin-Pascual F., Garcia-Fidalgo E. Visual inspection of vessels by means of a micro-aerial vehicle: an artificial neural network approach for corrosion detection. *Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference*. Heidelberg: Springer, 2016, 320 p.

17. Igoe D., Parisi A.V. Characterization of the corrosion of iron using a smartphone camera. *Instruments Science Technology*, 2016, vol. 44 (2), pp. 139–147. DOI: 10.1080/10739149.2015.1082484.
18. Son H., Hwang N., Kim C. Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems. *Automation in Construction*, 2014, vol. 42, pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.02.016.
19. Alkanhal T.A. Image processing techniques applied for pitting corrosion analysis. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2014, vol. 3 (1), pp. 315–336.
20. Grengg C., Müller B., Staudinger C. et al. High-resolution optical pH imaging of concrete exposed to chemically corrosive environments. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 116, pp. 231–237.
21. Laptev A.B., Kogan A.M., Nikolaev E.V. et al. Mathematical modeling of the processes of production and aging of polymer composite materials. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 65–75. DOI: 10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75.
22. Startsev V.O., Kutsevich K.E., Khrulev K.A., Molokov M.V. Prediction of the surface temperature of samples of composite materials based on adhesive prepregs when exposed to climatic conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 9, pp. 24–31.
23. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
24. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 1. Requirements for materials. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-180-188.
25. Gorbovets M.A., Nikolaev E.V., Startsev V.O. Climate testing of Arctic materials. Part 2. Test requirements. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-138-147.

Информация об авторах

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

Матишов Геннадий Григорьевич, научный руководитель, академик РАН, ЮНЦ РАН, ssc-ras@ssc-ras.ru

Щербакова Алина Вячеславовна, аспирант, УГНТУ, info@rusoil.net

Лапшин Игорь Геннадиевич, инженер-лаборант, УГНТУ, info@rusoil.net

Губайдуллин Ирек Марсович, профессор кафедры, д.ф.-м.н., УГНТУ, info@rusoil.net

Information about the authors

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

Gennady G. Matishov, Scientific Adviser, Academician of the RAS, SSC of the RAS, ssc-ras@ssc-ras.ru

Alina V. Shcherbakova, Graduate Student, USPTU, info@rusoil.net

Igor G. Lapshin, Laboratory Engineer, USPTU, info@rusoil.net

Irek M. Gubaidullin, Professor of Chair, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), USPTU, info@rusoil.net

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.07.2025.
The article was submitted 30.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 09.07.2025.

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-149-169

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

П.В. Рыжков¹, М.А. Горбовец¹

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

Аннотация. На примере лабораторных образцов проверена модель развития повреждений, сочетающая оценку долговечности стадии их зарождения и распространения. Критерий малоциклового усталости на основе энергетического критерия определяет долговечность первой стадии кинетической диаграммы. Выбор начальной длины трещины для расчета второй стадии определяется началом линейного участка кинетической диаграммы. Для вычисления остаточной долговечности необходимо иметь кривую зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины для геометрической формы изделия, вида нагружения и формы трещины. Ошибка прогнозирования долговечности по предложенной модели составила 20 %.

Ключевые слова: механические свойства, характеристики усталости, жаропрочные деформируемые никелевые сплавы, модели материалов, скорость роста трещины усталости, циклическая пластичность

Для цитирования: Рыжков П.В., Горбовец М.А. Применение энергетического критерия для оценки усталостной долговечности никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 13. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-149-169.

Scientific article

APPLICATION OF ENERGY CRITERION TO EVALUATE FATIGUE LIFE OF NICKEL ALLOY OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

P.V. Ryzhkov¹, M.A. Gorbovets¹

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

Abstract. Using laboratory samples as an example, a damage development model combining the assessment of the durability of the nucleation and propagation stages was tested. The LCF criterion based on the energy criterion determines the durability of the first stage of the kinetic diagram. The choice of the initial crack length for calculating the second stage is determined by the beginning of the linear section of the kinetic diagram. To calculate the residual durability, it is necessary to have a curve of the dependence of the SIF on the crack length for the geometry of the sample, the type of loading and the shape of the crack. The durability prediction error for the proposed model was 20 %.

Keywords: mechanical properties, fatigue characteristics, heat-resistant wrought nickel alloys, material models, fatigue crack growth rate, cyclic plasticity

For citation: Ryzhkov P.V., Gorbovets M.A. Application of energy criterion to evaluate fatigue life of nickel alloy obtained by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 13. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-149-169.

Введение

Поиск критерия усталости и оценка условий разрушения при циклическом нагружении для металлических изделий аддитивного производства вызывают растущий интерес в нескольких промышленных областях – аэрокосмической, автомобильной и медицинской [1–3]. Основная причина повышенного интереса заключается в определенном недостатке знаний методического плана по оценке прочности изделий аддитивного производства. Применение нескольких алгоритмов экспонирования при послойном сплавлении формирует локальные области неоднородности по текстуре, размеру зерна и их распределению в объеме изделия [4]. Традиционные методы получения конструктивных деталей, применяемых в узлах газотурбинных двигателей, лишены данного недостатка по причине однородности свойств по объему.

Усталостное поведение металлических изделий аддитивного производства существенно зависит от двух основных факторов, присущих процессу селективного лазерного сплавления (СЛС) [5, 6]. Первый фактор связан с наличием дефектов в виде газовой пористости, несплавлений и комкования, второй фактор – с обработкой поверхности и ее структурным состоянием. В практике аддитивного производства при обработке поверхности существуют определенные сложности по причине разнообразной геометрической формы изделий с тонкими стенками, внутренними каналами и точечными конструкциями. Взаимодействие указанных факторов имеет важное значение для усталостного поведения изделий аддитивного производства. Например, когда преобладает первый фактор в условиях шлифования и полирования, то преобладающая ориентация и максимальный размер подповерхностного дефекта определяют усталостную долговечность. Однако процессов последующей поверхностной обработки часто избегают в связи с очень сложными геометрическими формами деталей, поэтому основное внимание сосредоточено на развитии повреждений на поверхности изделий аддитивного производства. Так, в работе [7] оценка предела выносливости образцов СЛС из титанового сплава Ti–6Al–4V с использованием эквивалентного размера дефекта, рассчитанная по измеренным значениям профиля шероховатости, показала отсутствие сходимости с экспериментальными результатами. Авторы пришли к выводу, что корреляция между усталостной долговечностью и коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) поверхностных дефектов гораздо больше по сравнению с корреляцией между долговечностью и напряжением в рабочей части образца. В работе [8] авторы показали, что эмпирическая формула для периодических поверхностных надрезов с параметрами профиля R_a и R_z по-прежнему верна с приемлемой точностью. Более того, некоторые исследователи предложили новые модели, в основе которых лежит расчет КИН по линейной теории упругости измеренных впадин профиля шероховатости [9].

С использованием компьютерной томографии [10] на образцах аддитивного производства после циклического нагружения на поверхности выявлено большое количество трещин, развивающихся от впадин профиля шероховатости. Проведено исследование по оценке стадийности разрушения аустенитной стали марки 316L аддитивного производства с использованием акустической эмиссии. Сделано заключение, что основным механизмом разрушения являются раскрытие и рост малых трещин, зародившихся на технологических дефектах. Указано также, что характерный размер микротрещин в материале аддитивного производства на порядок больше, чем наблюдаемый в материале, изготовленном традиционными методами.

Разделение процесса разрушения на две стадии (зарождение и распространение трещин) в соответствии с кинетической диаграммой усталостного разрушения – это эффективный инструмент прогнозирования усталостной долговечности [11]. В работе [12] оценивались зоны потенциального усталостного разрушения при использовании модели пластичности и энергетического критерия применительно к трехслойным алюминиевым панелям. В результате расчетная долговечность сопоставлена с экспериментальной и получена приемлемая сходимость результатов. Цель данной работы заключалась в использовании энергетического критерия усталостной долговечности для оценки стадии зарождения повреждений и формулы линейной механики разрушения для оценки распространения повреждений в лабораторных образцах в условиях эксплуатационной температуры.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Выбранный никелевый сплав аддитивного производства для оценки усталостной долговечности и развития повреждений по химическому составу полностью идентичен сплаву марки ВЖ159 с химическим составом, % (по массе):

Ni	Cr	Al	Mo	Nb	V	C
Основа	25–28	1,25–1,55	7–8	2,5–3,5	0,005	0,05–0,09

Из заготовок сплава получали порошок расплава в потоке аргона. Фракционный состав порошка – от 10 до 63 мкм. Процесс СЛС проводили в среде азота. Полученные заготовки образцов подвергали полной термической обработке: закалке и двухступенчатому старению по стандартным режимам. Информация о формировании фазового состава никелевых сплавов аддитивного производства и морфологии упрочняющей фазы подробно изложена в работах [14, 15].

Значения усталостной долговечности получены на динамической сервогидравлической испытательной машине при повышенной температуре (650 °С), частоте 1 Гц и контроле амплитуды полной деформации (упругой и пластической) синусоидального отнулевого цикла ($R_\epsilon = 0$). Испытаны гладкие цилиндрические образцы и образцы с С-образным концентратором напряжений в режиме малоциклового нагружения. Для получения полной кинетической диаграммы усталостного разрушения испытаны компактные образцы в соответствии с требованиями стандарта ASTM E647. Терминология и особенности режимов циклического нагружения изложены в работах [16, 17].

Моделирование упругопластического поведения и расчет КИН производили в автоматической среде вычислений конечных элементов [18].

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

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены данные, полученные при определении предела выносливости на базе 10^4 циклов по результатам испытаний 25 гладких образцов с обработкой поверхности и 9 образцов с надрезом при температуре 650 °С. Для оценки циклической трещиностойкости проведены также испытания двух компактных образцов при двух различных режимах нагружения (возрастание КИН/убывание КИН).

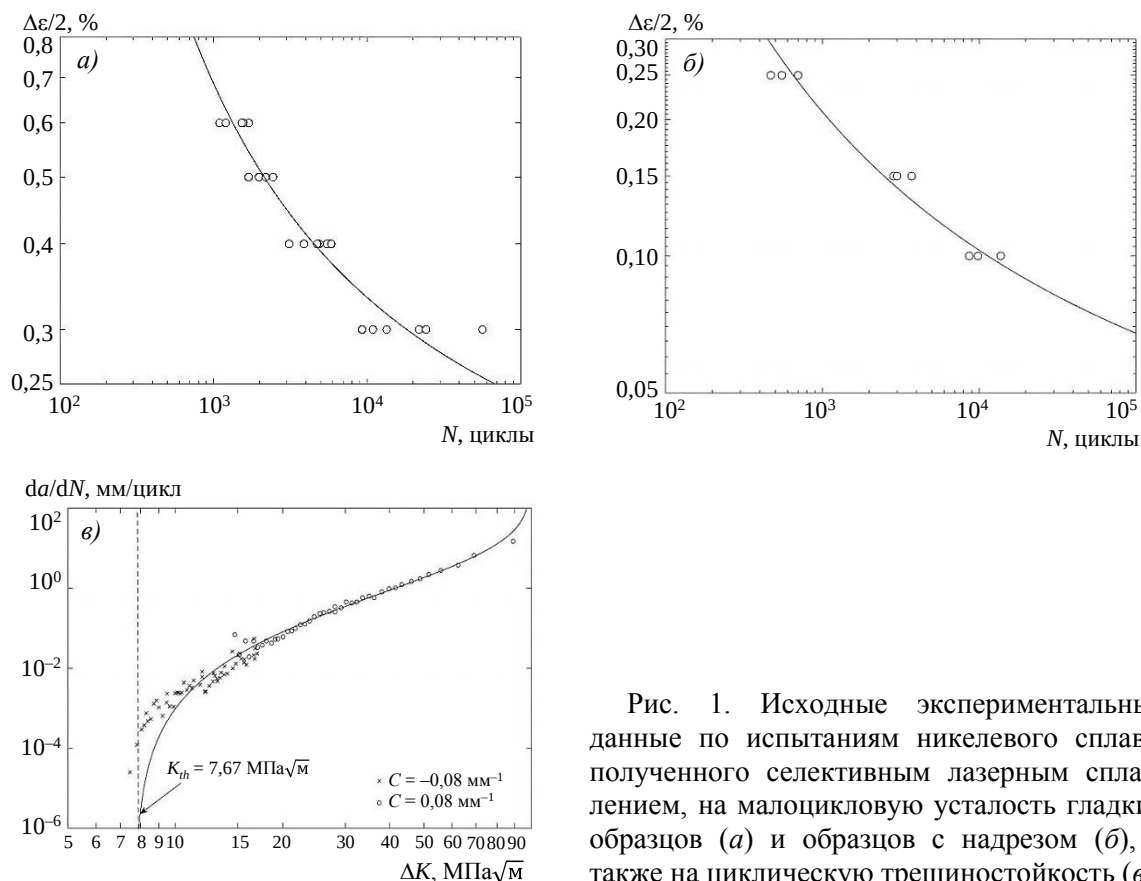


Рис. 1. Исходные экспериментальные данные по испытаниям никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением, на малоциковую усталость гладких образцов (а) и образцов с надрезом (б), а также на циклическую трещиностойкость (в)

Энергетический критерий усталостной долговечности

В фундаментальной работе [19] утверждается, что произведение максимального растягивающего напряжения и амплитуды общей деформации определяет усталостную долговечность:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f^2}{E} N^{2b} + \epsilon_f \sigma_f N^{b+c},$$

где $\Delta\epsilon/2$ – амплитуда полной деформации; N – число циклов до разрушения; E – модуль упругости; σ_f , ϵ_f – коэффициенты усталостной долговечности и пластичности; b , c – показатели усталостной долговечности и пластичности.

Произведение максимального растягивающего напряжения и амплитуды общей деформации обычно интерпретируется как величина энергии деформации. В зарубежной научно-технической литературе данный критерий предельного состояния имеет обозначение SWT (критерий Смита–Уотсона–Топпера). На рис. 2 изображена схема петли гистерезиса и произведения максимального растягивающего напряжения и амплитуды общей деформации. Как следует из данной схемы, произведение максимального растягивающего напряжения и амплитуды общей деформации частично перекрывает общую площадь петли гистерезиса.

Экспериментальные результаты для гладких образцов при «жестком» цикле нагружения и расчет параметра SWT при эксплуатационной температуре приведены в табл. 1 и на рис. 3.

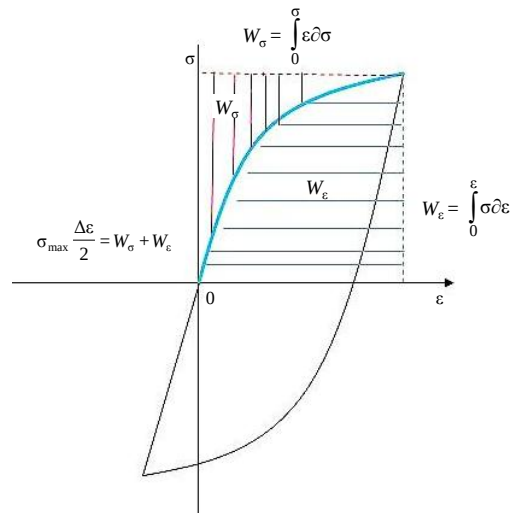
Рис. 2. Интерпретация параметра SWT как величины энергии деформации W_ε

Таблица 1

Экспериментальные результаты для гладких образцов при «жестком» цикле нагружения и расчет параметра SWT

$\Delta\varepsilon/2$	$\Delta\sigma/2$, МПа	$\Delta\varepsilon_{пл}/2$	σ_{max} , МПа	N	P_{SWT}
0,006	616	0,00246	607	723	3,64
0,006	566	0,00227	591	1199	3,55
0,006	569	0,00264	564	1532	3,38
0,006	562	0,00264	556	1569	3,34
0,005	539	0,00183	550	1694	2,75
0,006	575	0,00231	598	1700	3,59
0,005	551	0,00162	573	1974	2,86
0,005	526	0,00177	537	2181	2,69
0,005	548	0,00164	565	2189	2,82
0,005	538	0,00177	544	2437	2,72
0,004	540	0,00063	546	3102	2,18
0,004	503	0,00103	525	3876	2,10
0,004	506	0,00081	530	4748	2,12
0,004	495	0,00103	527	4783	2,11
0,004	503	0,00102	539	4895	2,16
0,004	487	0,00096	516	5473	2,06
0,004	502	0,00082	558	5685	2,23
0,004	480	0,00098	525	5876	2,10
0,003	458	0,00025	536	13392	1,61
0,003	454	0,00146	505	14334	1,52
0,003	454	0,00034	499	21943	1,50
0,003	457	0,00015	580	24349	1,74
0,003	462	0,00017	547	56474	1,64

Расчет кривой зависимости параметра P_{SWT} от долговечности N (рис. 3) производился на основании определенных свойств материала уравнения Мэнсона–Коффина (табл. 2). Результаты произведения максимального напряжения на амплитуду деформации P_{SWT} получены из экспериментальных данных. Как можно наблюдать, кривая зависимости параметра P_{SWT} от долговечности N позволяет с достаточной точностью прогнозировать долговечность сплава ВЖ159, полученного СЛС, при эксплуатационной температуре.

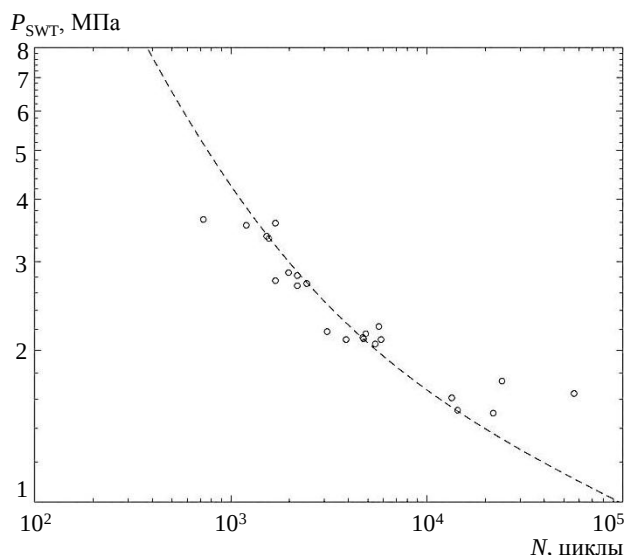
Рис. 3. Кривая усталостной долговечности в зависимости от параметра P_{SWT}

Таблица 2

Определенные параметры уравнения Мэнсона–Коффина

σ_f , МПа	b	ϵ_f	c
1148	-0,097	6,75	-1,068

Моделирование упругопластического поведения гладких образцов

При моделировании упругопластического поведения исследуемых образцов определяющие соотношения пластичности включали кинематическое и изотропное упрочнение [20]. Для разделения областей упругого и пластического деформирования вводится термин поверхность текучести. Эволюция данной поверхности обусловлена пластическим течением. Размер поверхности определяется законом изотропного упрочнения, а положение – нелинейным кинематическим. С допущением о малых деформациях, начальной изотропной упругости и связанной с ней пластичностью сформируем основные положения предложенной модели:

- аддитивное разложение тензора деформаций – $\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_e$, где ϵ – тензор деформаций; ϵ_p – тензор пластических деформаций; ϵ_e – тензор упругих деформаций;
- закон Гука – $\sigma = E\epsilon_e$, где σ – тензор напряжений; E – модуль упругости;
- граница области допустимых напряжений – поверхность текучести, которая задается уравнением $f(\sigma) = 0$, где f – выпуклая непрерывная функция, определенная на пространстве симметричных тензоров второго ранга, при этом $f(\sigma) < 0$ является условием упругого нагружения:

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \sigma_y(\epsilon_{pe});$$

$$f(\sigma) = \sqrt{3J_2} - \sigma_y(\epsilon_{pe});$$

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}} - \sigma_y(\epsilon_{pe}),$$

где σ_i – главные направления тензора напряжений (индекс i относится к трем главным напряжениям); J_2 – второй инвариант тензора напряжений; σ_{ij} – компоненты симметричного тензора напряжений второго ранга ($i, j = 1, 2, 3$); σ_y – функция изотропного упрочнения; ϵ_{pe} – эквивалентная

(накопленная) пластическая деформация (изменение поверхности нагружения определяется функцией накопленной пластической деформации ε_{pe});

– ассоциированный закон течения: $\partial \varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}$, где ε^p – скорость пластической деформации; λ – коэффициент, зависящий от условий нагружения;

– закон изотропного упрочнения: $f(\sigma, \varepsilon_{pe}) = \sigma_e - \sigma_y(\varepsilon_{pe}) = 0$, $\sigma_y(\varepsilon_{pe}) = \sigma_{y0} + r(\varepsilon_{pe})$, $r(\varepsilon_{pe}) = \sigma_{sat} (1 - e^{-\beta \varepsilon_{pe}})$, где σ_{y0} – начальное напряжение пластического течения; $r(\varepsilon_{pe})$ – функция изотропного упрочнения; β , σ_{sat} – характеристики изотропного упрочнения материала;

– закон кинематического упрочнения в сочетании с изотропным $f(\sigma) = |\sigma_{11} - \sigma_b| - \sigma_y(\varepsilon_{pe})$, $\partial \sigma_b = \frac{2}{3} C_k \partial \varepsilon_{pe} - \gamma \sigma_b \partial \varepsilon_{pe}$, C_k – кинематический модуль упрочнения; σ_b , γ – характеристики кинематического упрочнения материала.

Коэффициенты определяющих соотношений найдены методом нелинейной оптимизации Левенберга–Марквардта в автоматизированной среде вычислений и приведены в табл. 3 для каждого уровня деформации [21, 22].

Таблица 3

**Параметры оптимизации определяющих соотношений
упругопластического деформирования никелевого жаропрочного сплава**

Амплитуда деформации $\Delta \varepsilon/2$, %	Параметры оптимизации			
	σ_{sat} , МПа	β	C_k , МПа	γ
0,6	40,13	8,214	35160	70,321
0,5	25,11	4,533	28561	42,131
0,4	19,51	4,376	31661	97,288
0,3	20,11	54,811	57261	197,201

Примечание. β , σ_{sat} – характеристики изотропного упрочнения материала; C_k – кинематический модуль упрочнения; γ – характеристика кинематического упрочнения материала.

Для применения энергетического критерия для расчета усталостной долговечности использована осесимметричная модель четверти образца (рис. 4) ввиду его осевой и центральной симметрии с граничными условиями, соответствующими эксперименту по одноосному циклическому растяжению-сжатию при контролируемой деформации.

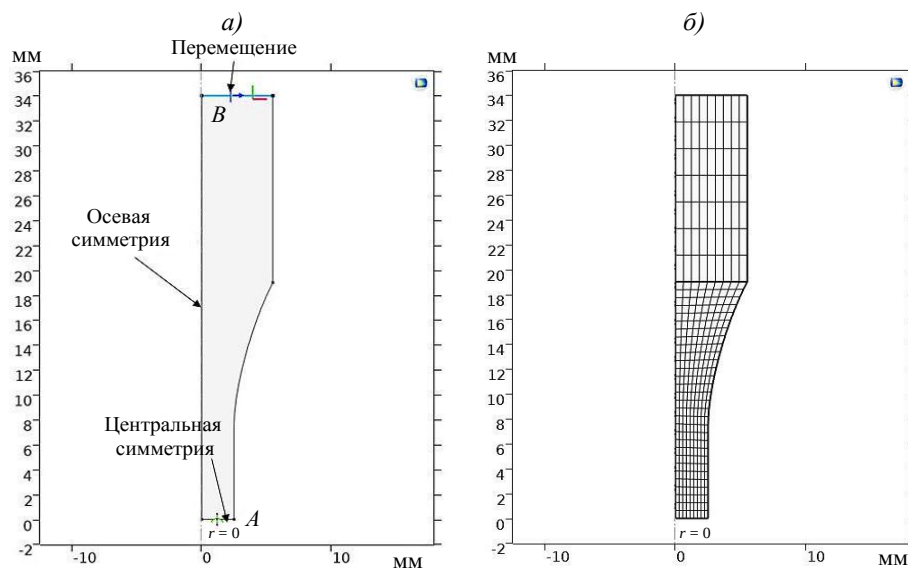


Рис. 4. Осесимметричная модель гладкого образца: а – граничные условия; б – сеточное разбиение

Осесимметричный вариант модели использует цилиндрические координаты r , φ и z (рис. 5).

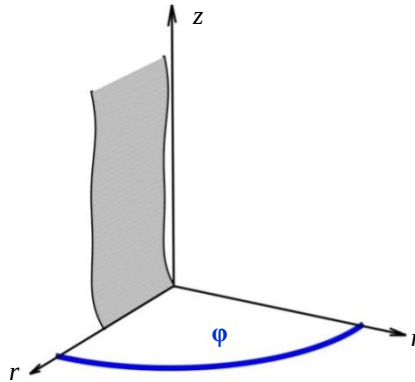


Рис. 5. Цилиндрическая система координат при описании осесимметричной модели

Перемещения не зависят от параметра φ , но допустимы в направлениях r и z . Двумерная осесимметричная геометрическая форма рассматривается как пересечение исходного трехмерного тела и полуплоскости с $\varphi = 0$ и $r \geq 0$. Градиент перемещения относительно цилиндрических координат имеет вид:

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{u}{R} & \frac{\partial u}{\partial Z} \\ \frac{\partial v}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u}{R} & \frac{\partial v}{\partial Z} \\ \frac{\partial w}{\partial R} & \frac{1}{R} \frac{\partial w}{\partial \varphi} & \frac{\partial w}{\partial Z} \end{bmatrix},$$

где R – радиальная координата; φ – угловая координата; z – осевая координата; $u(R, Z)$ – радиальное перемещение; $v(R, Z)$ – окружное (тангенциальное) перемещение; $w(R, Z)$ – осевое перемещение.

Предположение об осевой симметрии позволяет пренебрегать градиентами в азимутальном направлении – вектор перемещения считается независимым от азимутального угла $u=u(R, Z)$, поэтому:

$$\frac{\partial u}{\partial \varphi} = \frac{\partial v}{\partial \varphi} = \frac{\partial w}{\partial \varphi} = 0$$

и градиент перемещения после этого соотношения имеет вид:

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} & \frac{v}{R} & \frac{\partial u}{\partial Z} \\ \frac{\partial v}{\partial R} & \frac{u}{R} & \frac{\partial v}{\partial Z} \\ \frac{\partial w}{\partial R} & 0 & \frac{\partial w}{\partial Z} \end{bmatrix}.$$

Далее предполагаем, что кручение вокруг оси симметрии отсутствует, поэтому нет и перемещения вне плоскости, т. е. $v = 0$:

$$\nabla u = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial R} & 0 & \frac{\partial u}{\partial Z} \\ 0 & \frac{u}{R} & 0 \\ \frac{\partial w}{\partial R} & 0 & \frac{\partial w}{\partial Z} \end{bmatrix}.$$

В качестве функции нагружения в модели использовалась функция треугольника с пиковыми значениями деформации, соответствующими контролируемым значениям из эксперимента (рис. 6). Размах перемещения грани B вычисляли посредством интегрирования компоненты тензора деформации ε_z в точке A . Для расчета долговечности необходимы как минимум два последовательных блока нагружения. В первом блоке определяется начальное условие напряженно-деформированного состояния, которое затем переопределяется во втором блоке для оценки параметра усталости.

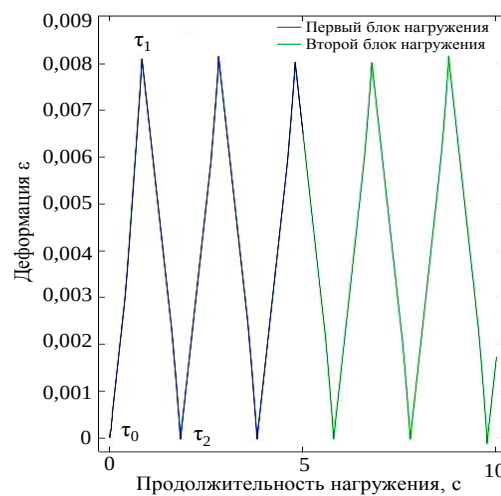


Рис. 6. Форма волны нагружения при моделировании циклического нагружения, соответствующая контролируемым пикам деформации из эксперимента при $\Delta\varepsilon = 0,8 \%$

Рассмотрим изменение компоненты тензора напряжений σ_z в точке A гладкого образца в течение двух блоков нагружения при размахе деформации $0,8 \%$ (рис. 7).

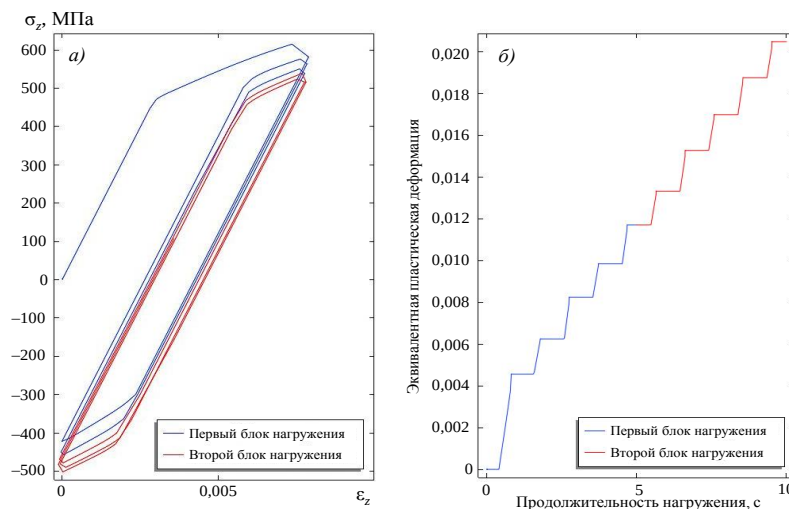


Рис. 7. Петли упругопластического гистерезиса (а) и изменение пластической деформации (б) в точке A гладкого образца

При нагружении образца до первого достижения максимальной нагрузки τ_1 напряжения в области рабочей части заметно превышают предел текучести материала (490 МПа), поэтому следует ожидать значительных пластических деформаций, что отражено на рис. 8, б.

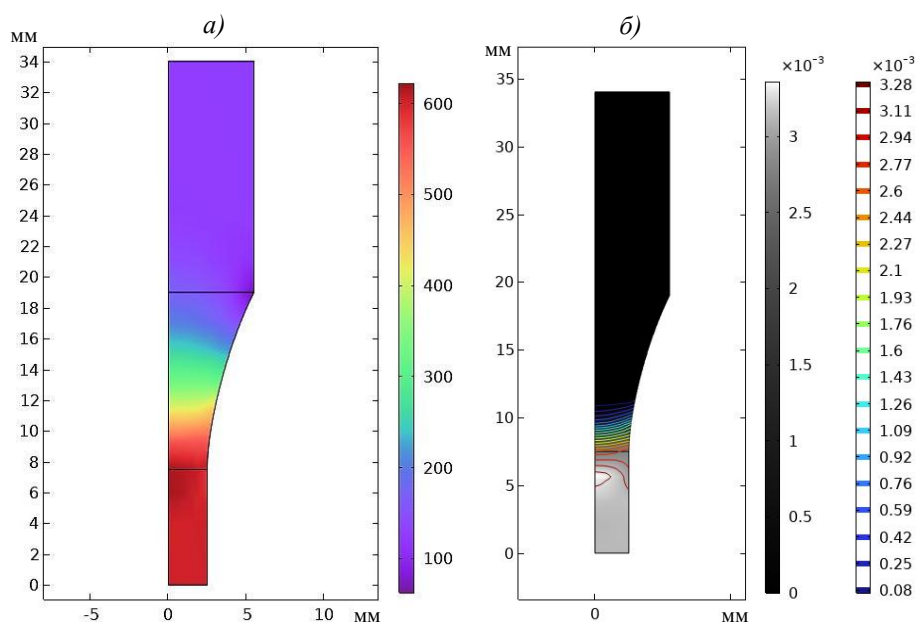


Рис. 8. Распределение напряжений (а) и эквивалентной пластической деформации (б) при достижении первой пиковой нагрузки τ_1 гладкого образца

При разгрузке τ_2 внешние силы отсутствуют, но присутствуют остаточные напряжения после снятия нагрузки в первом цикле (рис. 9).

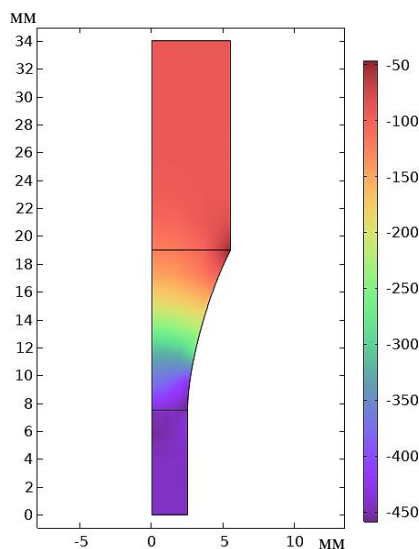


Рис. 9. Распределение напряжений при снятии нагрузки с гладкого образца

При втором блоке нагружения подразумевается стационарное состояние нагружения. Накопление пластической деформации следует рассматривать как главный повреждающий параметр при усталости. Максимальные напряжения при этом снижаются,

что обусловлено процессом релаксации напряжений. Интенсивность снижения определяет комбинация изотропного и кинематического упрочнения. Часто изотропное упрочнение связывают с продолжительностью циклического нагружения, в то время как кинематическое – с процессами внутри каждого цикла.

По результатам стабилизации петли гистерезиса и накопленной пластической деформации рассчитывают долговечность при использовании энергетического критерия в области рабочей части образца (рис. 10).

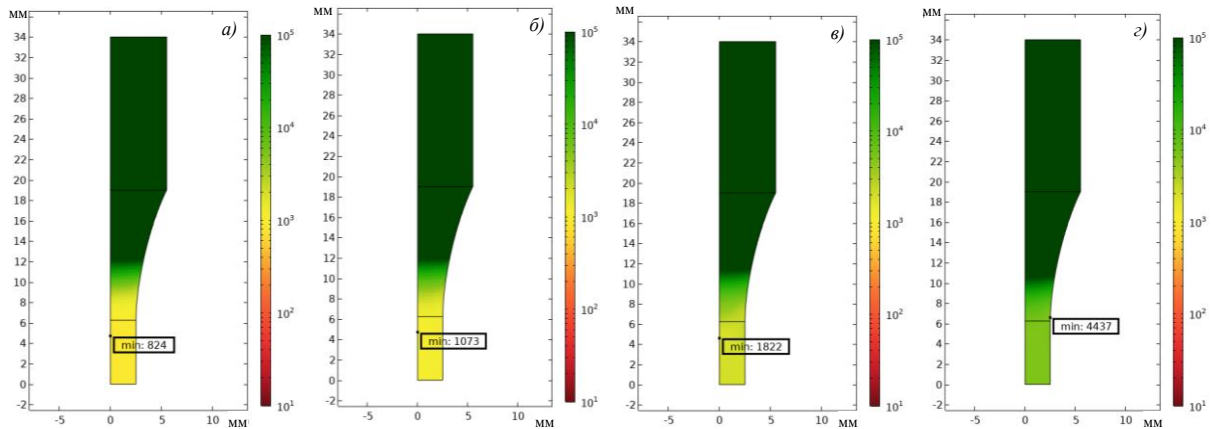


Рис. 10. Распределение усталостной долговечности гладкого образца при деформации $\Delta\epsilon/2$, %: 0,3 (а); 0,4 (б); 0,5 (в) и 0,6 (г)

Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования по параметру P_{SWT} представлено на рис. 11.

Результаты моделирования упругопластического поведения материала и применение энергетического критерия малоциклового усталости демонстрируют консервативную оценку долговечности, расположенную в окрестности линии минимальных значений.

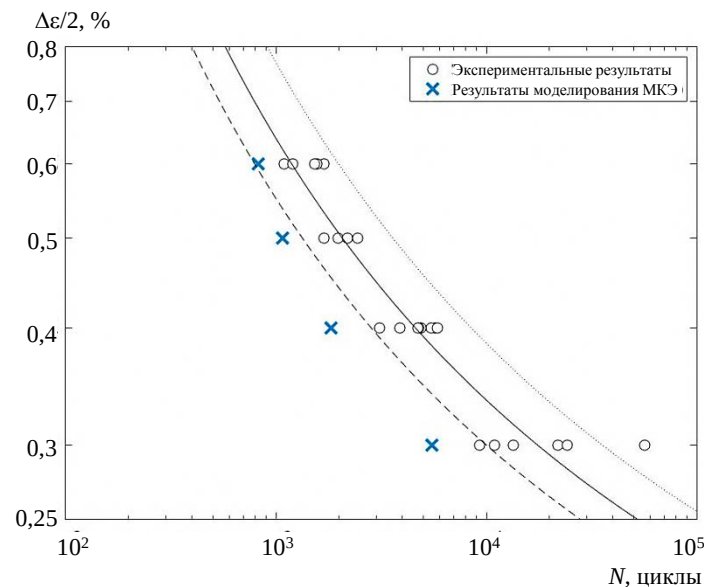


Рис. 11. Сравнение экспериментальных результатов определения усталостной долговечности с результатами численного моделирования

Моделирование упругопластического поведения образцов с концентратором напряжений С-типа

В качестве функции нагружения модели использовалась функция треугольника с пиковыми значениями деформации, соответствующими контролируемым значениям из эксперимента. Размах перемещения грани вычисляли посредством интегрирования компоненты тензора деформации ε_z в точке на удалении 6,25 мм от вершины надреза. Указанное расстояние соответствует точке фиксации датчика экстензометра из эксперимента (рис. 12).

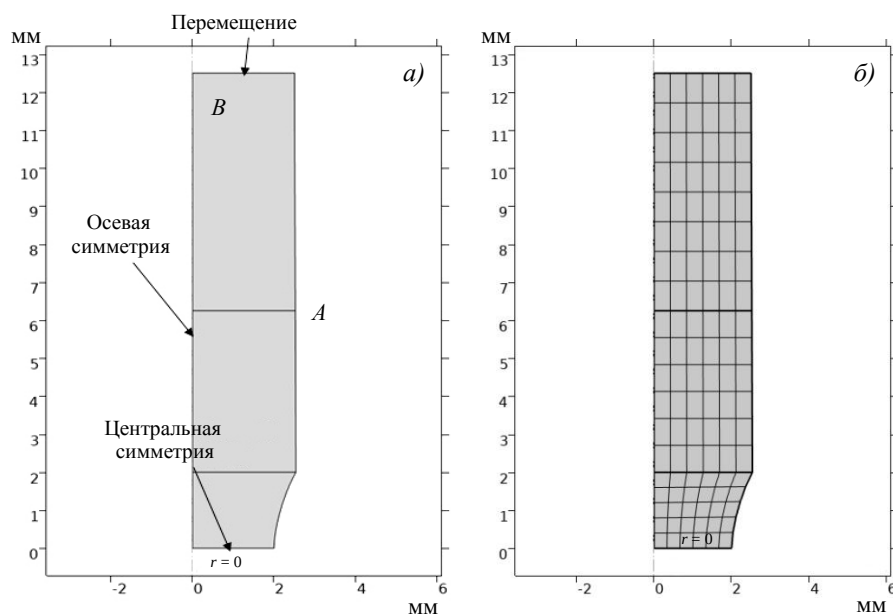


Рис. 12. Осесимметричная модель образца с концентратором напряжений С-типа: а – граничные условия; б – сеточное разбиение

На рис. 13 представлены петли гистерезиса для трех исследуемых уровней деформации, полученных численным моделированием в вершине концентратора напряжений.

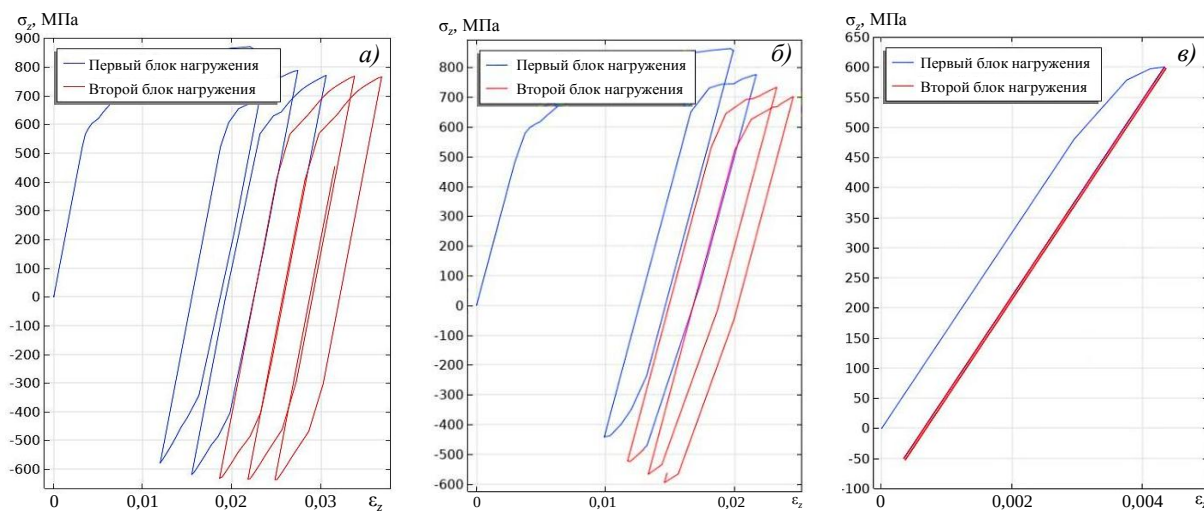


Рис. 13. Петли упругопластического гистерезиса образцов с концентратором напряжений при деформации $\Delta\varepsilon/2$, %: 0,25 (а); 0,225 (б) и 0,2 (в)

Применение параметра P_{SWT} позволило рассчитать усталостную долговечность по всему сечению образца (рис. 14).

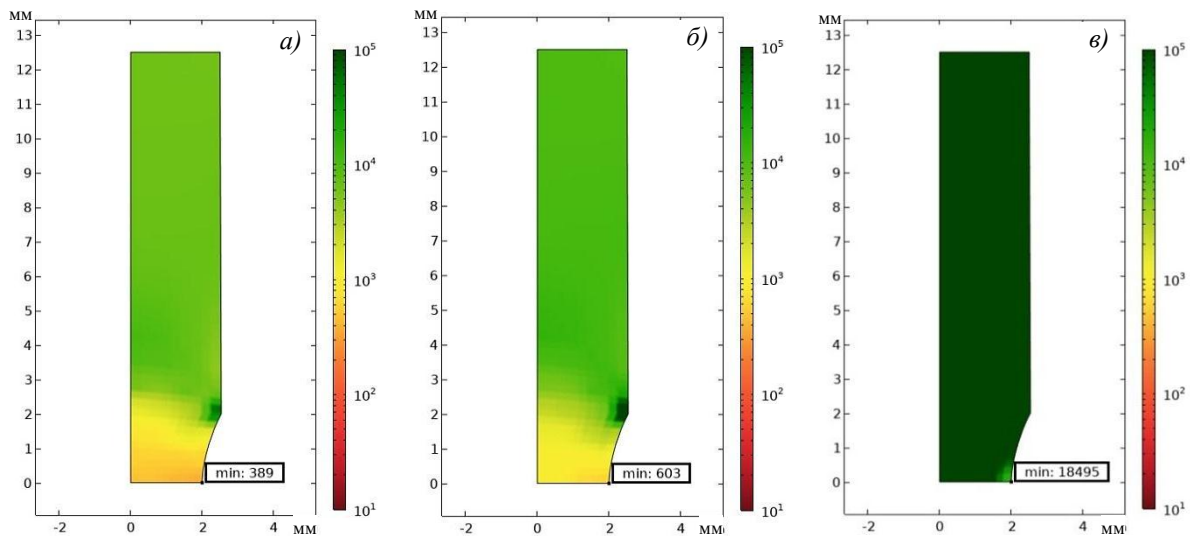


Рис. 14. Распределение усталостной долговечности образцов с концентратором напряжений при деформации $\Delta\varepsilon/2$, %: 0,25 (а); 0,225 (б) и 0,2 (в)

Сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования представлено на рис. 15.

Как и в случае с гладкими образцами, применение энергетического критерия малоциклового усталости для образцов с концентратором напряжений С-типа демонстрирует консервативную оценку долговечности, расположенную в окрестности линии минимальных значений.

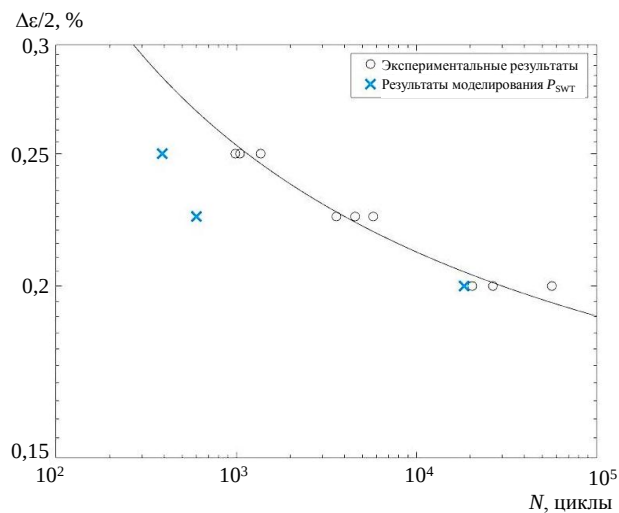


Рис. 15. Сравнение результатов прогнозирования усталостной долговечности по методу SWT с экспериментальными результатами образцов с концентратором напряжений

Таким образом, предполагается, что разрушение протекает в две стадии, при этом энергетический критерий P_{SWT} определяет долговечность при зарождении повреждений. Вторая стадия определяется вторым участком кинетической диаграммы (рис. 16).

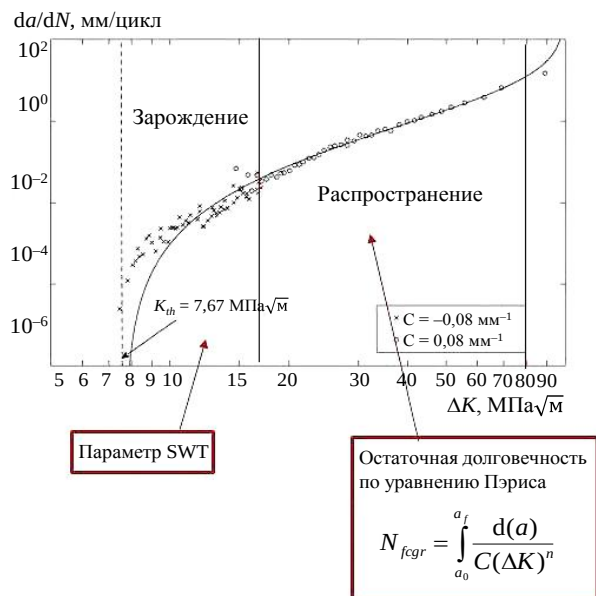


Рис. 16. Представление усталостного разрушения в виде двух стадий

Результаты фрактографии образцов и расчет КИН по данным фрактографии

На рис. 17 изображены поверхности разрушения гладкого образца, испытанного при амплитуде деформации 0,3 %.

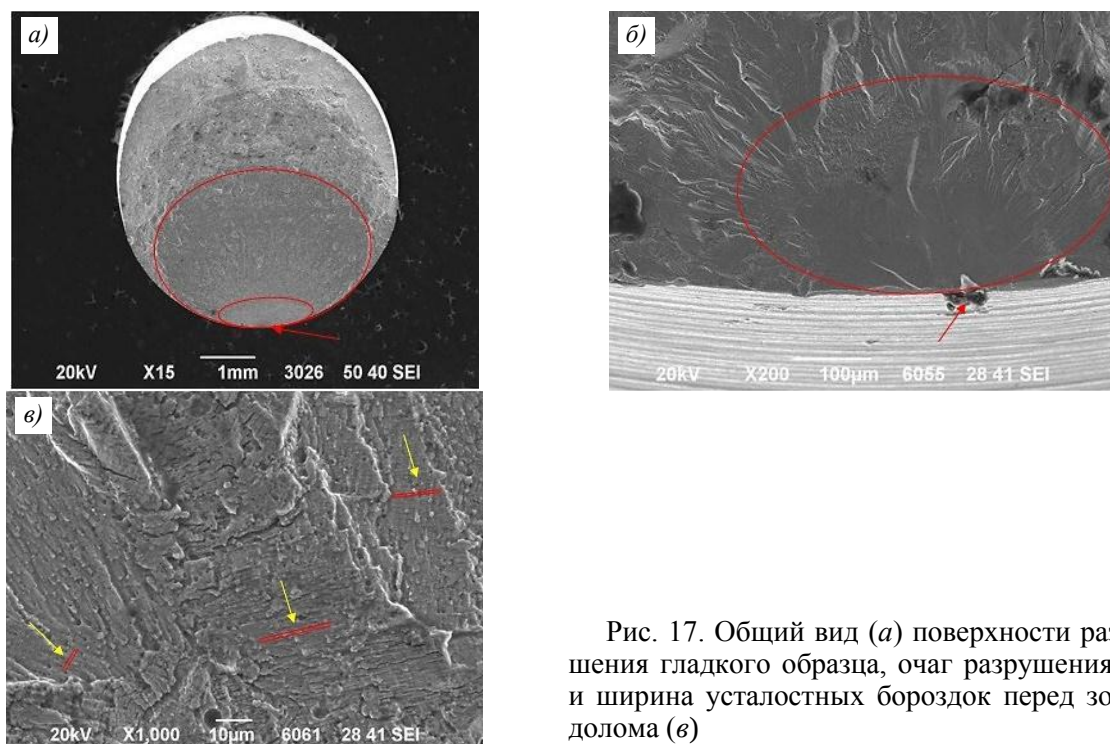


Рис. 17. Общий вид (а) поверхности разрушения гладкого образца, очаг разрушения (б) и ширина усталостных бороздок перед зоной долома (в)

Представленные изображения поверхности разрушения демонстрируют один очаг разрушения, представляющий собой фасетку скола, что свидетельствует о внутризеренном разрушении образца. Ширина усталостных бороздок перед зоной долома соответствует в среднем 1 мкм.

На рис. 18 изображены поверхности разрушения образца с концентратором напряжения С-типа, испытанного при амплитуде деформации 0,2 %.

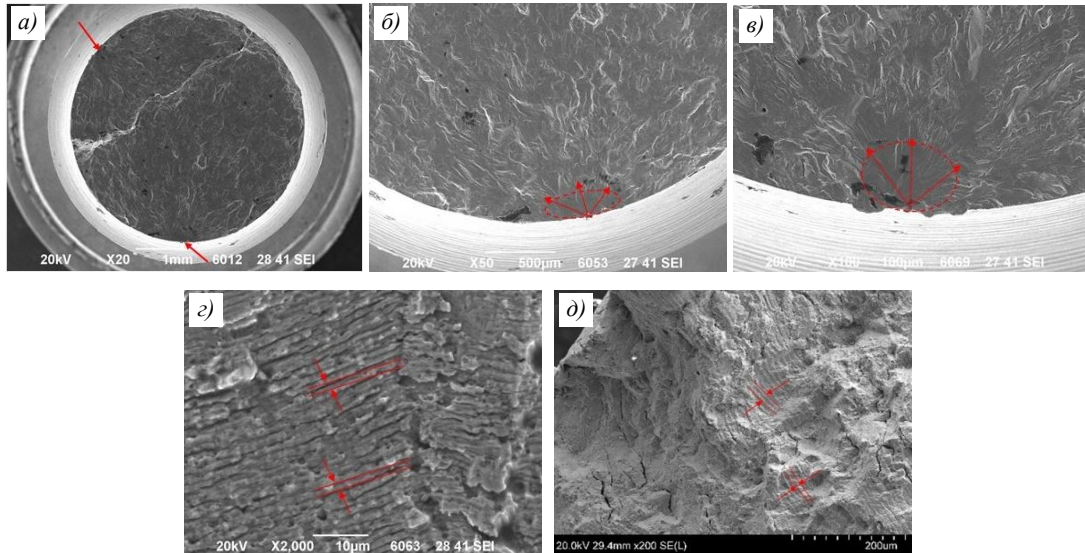


Рис. 18. Общий вид (а) поверхности разрушения образца с надрезом С-типа: очаги разрушения (б, в), ширина усталостных бороздок перед зоной долома (з) и после очага разрушения (д)

Представленные изображения поверхности разрушения демонстрируют два очага разрушения, расположенные на большом удалении друг от друга. При их соединении образуется «микроступенька». Очаг разрушения представляет собой фасетку скола эллиптической формы в одном случае с размером полуосей 154 и 346 мкм и 210 и 230 мкм – в другом. Ширина усталостных бороздок перед зоной долома соответствовала 1 мкм, что соответствует области КИН от 40 до 50 МПа $\sqrt{\text{м}}$ на кинетической диаграмме. Ширина усталостных бороздок возле очага разрушения составляла 600 нм, что соответствует области КИН от 8 до 10 МПа $\sqrt{\text{м}}$ на кинетической диаграмме.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние образца с трещиной, форма которой получена по результатам фрактографии, и рассчитаем долговечность по кинетическому уравнению Пэриса:

$$N_{fgr} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{d(a)}{C(\Delta K)^n},$$

где a_0 – начальная длина трещины; a_f – конечная длина трещины; ΔK – КИН; C , n – константы Пэриса.

Коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) лабораторных образцов рассчитаем с использованием J -интеграла:

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T_i \frac{du_i}{dx} ds = \int_{\Gamma} \left(W n_x - T_i \frac{du_i}{dx} \right) ds,$$

в котором W – плотность энергии деформации:

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \sigma_{xy} 2\epsilon_{xy})$$

и T определяется как

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y \\ \sigma_{xy} n_x + \sigma_y n_y \end{bmatrix},$$

где σ_{ij} – компоненты напряжений; ϵ_{ij} – компоненты деформаций; n_i – нормаль к контуру интегрирования (рис. 19).

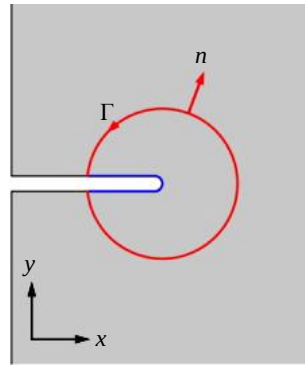


Рис. 19. Контур интегрирования Γ

Для линейно-упругого материала J -интеграл имеет следующую связь с КИН:

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{1}{1-\nu} K_{III}^2),$$

где ν – коэффициент Пуассона; K_i – КИН при i -й *модели* деформирования.

Компоненты напряжений и деформаций получим из трехмерной модели при осевом нагружении с использованием силового критерия, равного значению предела выносливости при фиксированной долговечности. Шаг продвижения эллиптических трещин (рис. 20) с отношением полуосей $b/a = 2$ соответствовал 0,2 мм.

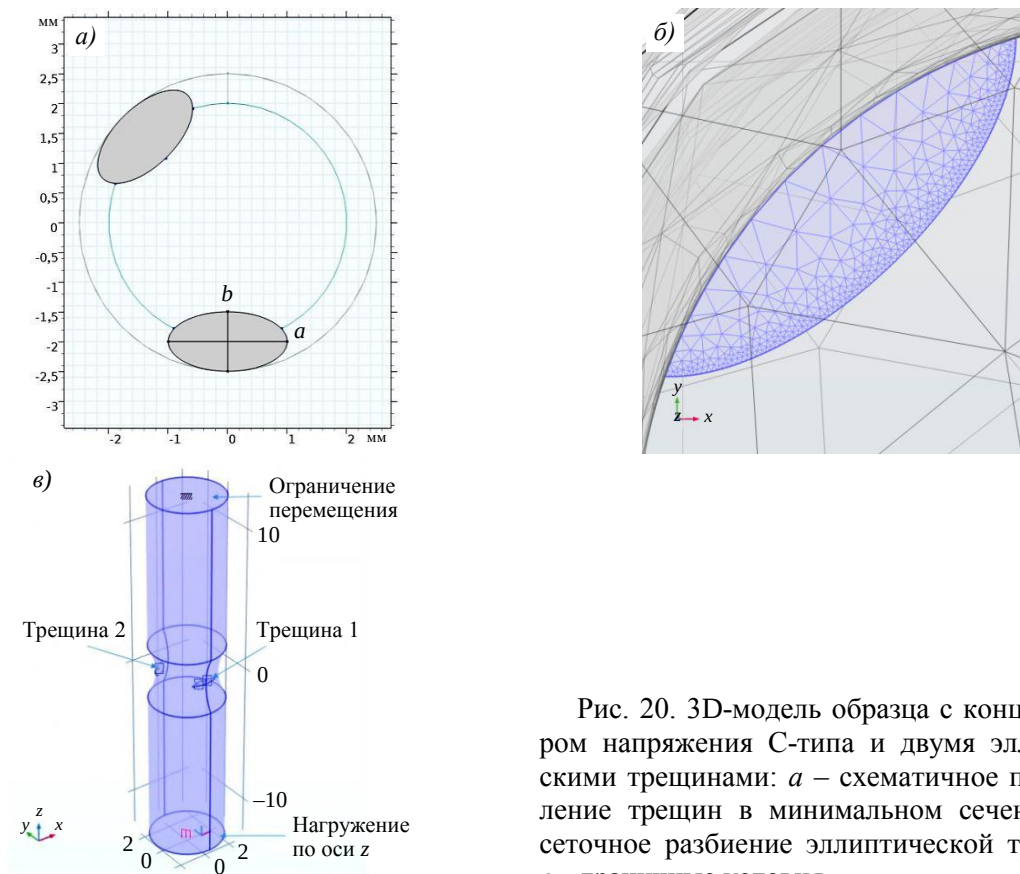


Рис. 20. 3D-модель образца с концентратором напряжения С-типа и двумя эллиптическими трещинами: a – схематическое представление трещин в минимальном сечении; b – сеточное разбиение эллиптической трещины; v – граничные условия

Аналогичным образом выглядела модель гладкого образца с эллиптической трещиной. Сетка состояла из треугольных 2D-элементов с расширенной дискретизацией

в области фронта трещины. Распределение J -интеграла и расчет КИН по длине фронта трещины гладкого образца и образца с концентратором напряжений приведены на рис. 21 и 22 соответственно.

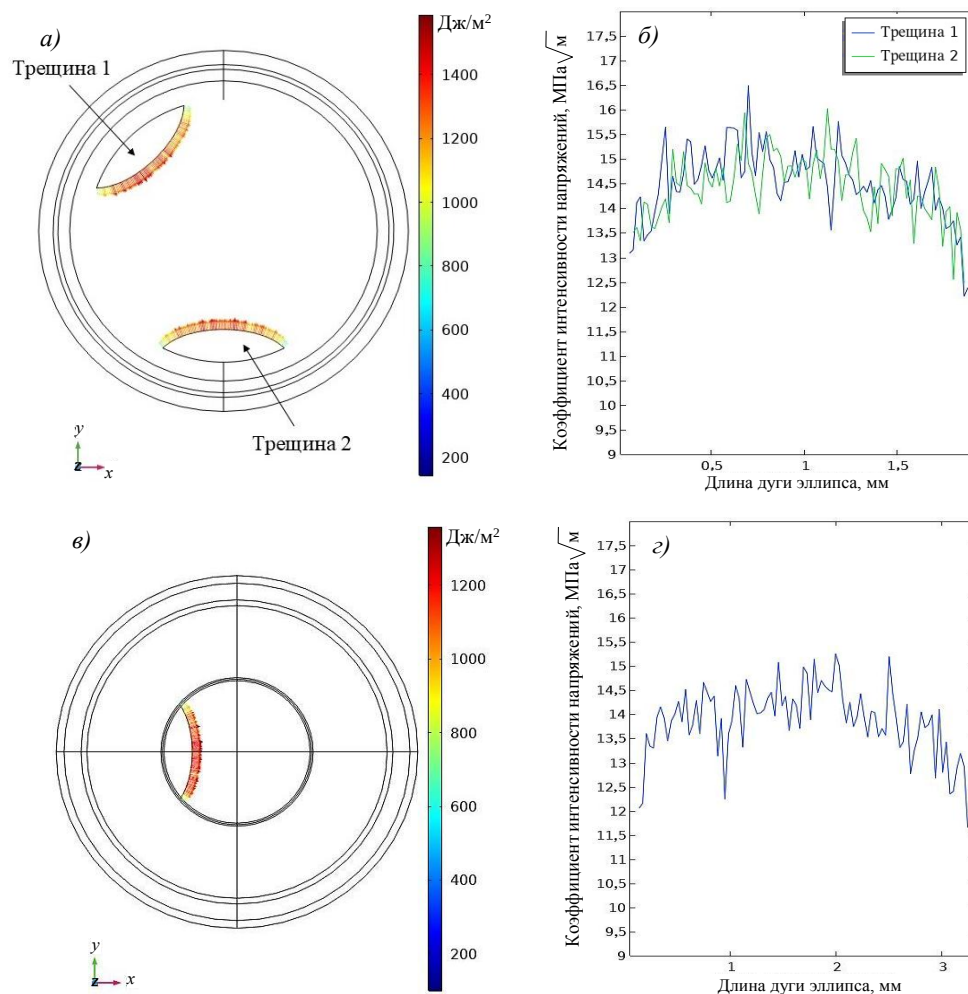


Рис. 21. Распределение J -интеграла и расчет КИН по дуге эллипса: образца с концентратором напряжений С-типа (а, б) и гладкого образца (в, з)

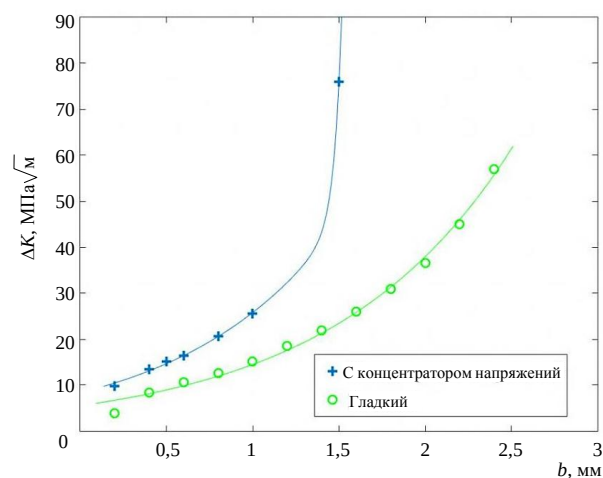


Рис. 22. Изменение КИН с увеличением длины трещины эллиптической формы лабораторных образцов

Условия расчета остаточной долговечности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета второй стадии распространения трещины

Тип образца	$\Delta\varepsilon/2$, %	Начальная длина трещины (мм)/КИН ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$)	Конечная длина трещины (мм)/КИН ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$)	Долговечность по кинетическому уравнению N_{fgr} , циклы
С концентратором напряжений	0,2	0,5/15,1	1,5/76	17 365
Гладкий	0,3	1/15,4	2,4/57	17 790

Полученные результаты моделирования роста трещин и расчета долговечности по параметру P_{SWT} обобщены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчета долговечности с использованием параметра P_{SWT} и второй стадии распространения трещины

Тип образца	$\Delta\varepsilon/2$, %	Долговечность по параметру P_{SWT} : N_{SWT} , циклы	Долговечность по кинетическому уравнению N_{fgr} , циклы	$N_{SWT} + N_{fgr}$, циклы	Экспериментальная долговечность N_{exp} , циклы	Ошибка, %
С концентратором напряжений	0,2	18 495	17 365	35 860	29 530	21
Гладкий	0,3	4437	17 790	22 227	18 420	17

Критерий малоциклового усталости на основе энергетического критерия P_{SWT} позволил определить долговечность первой стадии кинетической диаграммы усталостного разрушения. Остаточная долговечность рассчитана с использованием кинетического уравнения Пэриса для линейного участка диаграммы. Для этого использовали кривую зависимости КИН от длины трещины, построенную с учетом геометрической формы образца, его напряженно-деформированного состояния и формы фронта трещины. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными показало, что для образцов с цилиндрической рабочей частью ошибка прогноза относительно медианной кривой усталости составила 17 и 21 % – для образцов с надрезом С-типа.

Заключения

Таким образом, предложенный подход обеспечивает стадийное описание усталостного разрушения: долговечность зарождения трещины определяется энергетическим критерием P_{SWT} , а остаточный ресурс – уравнением Пэриса и экспериментально установленной зависимостью КИН от длины трещины. Фрактографический анализ подтвердил двухстадийность процесса: первая стадия соответствует внутризеренным сколам и микрорасслоениям, а вторая – линейному росту трещины. Разработанная методика показала достаточную точность (ошибка 17–21 %) и может быть использована для прогнозирования усталостной долговечности образцов различной геометрической формы.

Список источников

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: IV. Development of Superalloys // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. P. 1879–1887.

2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: III. Adaptation and Creation of Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 2023. P. 743–751.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: I. Synthesis Materials and Technologies // Russian Metallurgy (Metally). 2022. Vol. 2022. P. 611–618.
4. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. On the Mechanism of Formation of the Fine Structure of a Track in Selective Laser Melting // Metal Science and Heat Treatment. 2023. Vol. 65. P. 104–115.
5. Beretta S. More than 25 years of extreme value statistics for defects: Fundamentals, historical developments, recent applications // International Journal of Fatigue. 2021. Vol. 151. P. 106407. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106407.
6. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 11.11.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
7. Rogers J., Elambasseril J., Wallbrink C. et al. The impact of surface orientation on surface roughness and fatigue life of laser-based powder bed fusion Ti-6Al-4V // Additive Manufacturing. 2024. Vol. 85. P. 104149. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104149.
8. Macoretta G., Romanelli L., Santus C. et al. Modelling of the surface morphology and size effects on fatigue strength of L-PBF Inconel 718 by comparing different testing specimens // International Journal of Fatigue. 2024. Vol. 181. P. 108120. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.108120.
9. Rivolta B., Gerosa R., Panzeri D. Selective laser melted 316L stainless steel: Influence of surface and inner defects on fatigue behavior // International Journal of Fatigue. 2023. Vol. 172. P. 107664. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107664.
10. Демина Ю.А., Белецкий Е.Н., Болотников А.И. Влияние состояния поверхности на механические свойства и кинетику разрушения образцов из стали 316L, полученных селективным лазерным плавлением // Деформация и разрушение материалов. 2024. № 12. С. 26–38. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-12-26-38.
11. Kethamukkala K., Meng C., Chen J., Liu Y. Crack growth-based life prediction for additively manufactured metallic materials considering surface roughness // International Journal of Fatigue. 2023. Vol. 176. P. 107914. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107914.
12. Крыжевич Г.Б., Филатов А.Р. Модель упругопластического деформирования алюминиевых сплавов и критерии малоциклового усталости конструкций // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. № 2. С. 85–95. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-85-95.
13. 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.
14. Евгенов А.Г., Базылева О.А., Головлев Н.А., Зайцев Д.В. Особенности структуры и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al , полученных методом СЛС // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-25-36.
15. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Медведев П.Н., Зайцев Д.В., Рогалев А.М. Особенности формирования структурно-фазового состояния сплава ЭП648 при селективном лазерном сплавлении // Труды ВИАМ. 2021. № 8 (102). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-3-11.
16. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.

17. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
18. Электронная справка по моделированию структурной механики // Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com> (дата обращения: 01.12.2024).
19. Kujawski D. A deviatoric version of the SWT parameter // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 67. P. 95–102. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.12.002.
20. Simo J.C., Hughes T.J.R. *Computational Inelasticity*. New York: Springer, 1998. 392 p.
21. Levenberg K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares // *Quarterly of Applied Mathematics*. 1944. Vol. 2. P. 164–168.
22. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963. Vol. 11. P. 431–441.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: IV. Development of Superalloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, pp. 1879–1887.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: III. Adaptation and Creation of Materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 2023, pp. 743–751.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M. Next-Generation Materials and Digital Additive Technologies for the Production of Resource Parts in FGUP VIAM: I. Synthesis Materials and Technologies. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2022, vol. 2022, pp. 611–618.
4. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. On the Mechanism of Formation of the Fine Structure of a Track in Selective Laser Melting. *Metal Science and Heat Treatment*, 2023, vol. 65, pp. 104–115.
5. Beretta S. More than 25 years of extreme value statistics for defects: Fundamentals, historical developments, recent applications. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 151, p. 106407. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106407.
6. Movenko D.A., Shurtakov S.V. Microcrack formation and controlling in nickel superalloys processed by selective laser melting (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 11, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
7. Rogers J., Elambasseril J., Wallbrink C. et al. The impact of surface orientation on surface roughness and fatigue life of laser-based powder bed fusion Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 2024, vol. 85, p. 104149. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104149.
8. Macoretta G., Romanelli L., Santus C. et al. Modelling of the surface morphology and size effects on fatigue strength of L-PBF Inconel 718 by comparing different testing specimens. *International Journal of Fatigue*, 2024, vol. 181, p. 108120. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.108120.
9. Rivolta B., Gerosa R., Panzeri D. Selective laser melted 316L stainless steel: Influence of surface and inner defects on fatigue behavior. *International Journal of Fatigue*, 2023, vol. 172, p. 107664. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107664.
10. Demina Yu.A., Beletsky E.N., Bolotnikov A.I. Influence of surface condition on the mechanical properties and fracture kinetics of 316L steel samples obtained by selective laser melting. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2024, no. 12, pp. 26–38. DOI: 10.31044/1814-4632-2024-12-26-38.
11. Kethamukkala K., Meng C., Chen J., Liu Y. Crack growth-based life prediction for additively manufactured metallic materials considering surface roughness. *International Journal of Fatigue*, 2023, vol. 176, p. 107914. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107914.
12. Kryzhevich G.B., Filatov A.R. Model of elastoplastic deformation of aluminum alloys and criteria for low-cycle fatigue of structures. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2018, special is. no. 2, pp. 85–95. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-85-95.

13. 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.
14. Evgenov A.G., Bazyleva O.A., Golovlev N.A., Zaitsev D.V. Features of structure and property of alloys on the basis of Ni₃Al intermetallic compound, half-scientists method SLM. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-25-36.
15. Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Medvedev P.N., Zaitsev D.V., Rogalev A.M. Features of the formation of the structural-phase state of the EP648 alloy during selective laser manufacture. *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 21, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-3-11.
16. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
17. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
18. The electronic reference on modeling of structural mechanics. *Comsol Multiphysics*. Available at: <https://www.comsol.com> (accessed: December 01, 2024).
19. Kujawski D. A deviatoric version of the SWT parameter. *International Journal of Fatigue*, 2014, vol. 67, pp. 95–102. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.12.002.
20. Simo J.C., Hughes T.J.R. *Computational Inelasticity*. New York: Springer, 1998, 392 p.
21. Levenberg K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1944, vol. 2, pp. 164–168.
22. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, vol. 11, pp. 431–441.

Информация об авторах

Рыжков Петр Валерьевич, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Горбовец Михаил Александрович, начальник Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Petr V. Ryzhkov, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Michail A. Gorbovets, Head of Testing Centre, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; получена после доработки 28.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.05.2025.
The article was submitted 21.04.2025; received in revised form 28.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 28.05.2025.

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РОССИЙСКИМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЕЙ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ ИЗ «УЗЛА»

Р.Р. Иваньков^{1,2}, А.И. Сидорина¹, С.В. Котомин²

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Рассмотрен усовершенствованный метод определения прочности адгезионной связи углеродных волокон с эпоксидной матрицей вытягиванием из «узла». С помощью данного метода испытания можно определять адгезионную прочность на образцах из волокон в виде жгутов и контролировать давление при формировании адгезионного контакта. Методом вытягивания из «узла» определена адгезионная прочность двух марок отечественных углеродных волокон с эпоксидным связующим. Зона адгезионного разрушения исследована с помощью оптического микроскопа.

Ключевые слова: адгезионная прочность, арамидное волокно, углеродное волокно, адгезионная зона контакта, испытания на определение прочности, эпоксидное связующее

Для цитирования: Иваньков Р.Р., Сидорина А.И., Котомин С.В. Определение прочности адгезионной связи между российскими углеродными волокнами и эпоксидной матрицей методом вытягивания из «узла» // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 14. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

Scientific article

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF THE ADHESIVE BOND BETWEEN RUSSIAN CARBON FIBERS AND AN EPOXY MATRIX USING THE «LOOP» PULL-OUT TEST

R.R. Ivankov^{1,2}, A.I. Sidorina¹, S.V. Kotomin²

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. An improved method for determining the adhesive bond strength between carbon fibers and an epoxy matrix using a loop pull-out test is considered. This modified test method makes it possible to determine the adhesive strength of fibers in the form of bundles and control the pressure during the formation of an adhesive contact. The adhesive strength of two grades of domestic carbon fibers with an epoxy binder was determined using the loop pull-out test. After the test, the failure zone was examined using an optical microscope.

Keywords: adhesive strength, aramid fiber, carbon fiber, adhesive contact zone, strength testing, epoxy binder

For citation: Ivankov R.R., Sidorina A.I., Kotomin S.V. Determination of the strength of the adhesive bond between Russian carbon fibers and an epoxy matrix using the «loop» pull-out test. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 14. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

Введение

В XXI в. количество изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) для авиационной, космической, автомобильной и другой техники постоянно растет [1–5]. Стоит отметить, что исследованиям свойств деталей из ПКМ уделяется большое внимание. Методы физико-механических испытаний, обнаружения и определения дефектов постоянно совершенствуются. С целью уменьшения количества дефектов в готовых изделиях из ПКМ проводятся интенсивные работы в области определения оптимальных технологических параметров формования [6–10].

Для изготовления нагруженных конструкций из ПКМ применяют преимущественно эпоксидные смолы и углеродные волокна [5, 11]. Согласно данным работ [11, 12], такой тип полимерных связующих используется при изготовлении лакокрасочных материалов, клеев, компаундов и конструкционных материалов. Отметим, что углеродные волокна и эпоксидные матрицы существенно отличаются по химическим, упруго-прочностным, теплофизическим, деформационным и другим свойствам.

Одна из самых важных задач исследователей и ученых при разработке новых типов связующих – определение адгезионной прочности между матрицей и армирующим наполнителем. Это важный фактор при разработке ПКМ, так как именно от полимерного связующего будет зависеть получение эффективного распределения нагрузки на армирующие волокна в конструкционных материалах. Наиболее высокие упруго-прочностные показатели можно получить при ориентации волокна в направлении приложения растягивающих напряжений.

При взаимодействии армирующего наполнителя и полимерного связующего возникают физические и химические связи между двумя поверхностями, т. е. адгезия. Существуют несколько теоретических подходов к анализу адгезионных явлений: механический, электронный, диффузионный и адсорбционный. Улучшая прочность адгезионного контакта, можно повышать физико-механические свойства ПКМ [13].

Адгезионная прочность между терморезистивными связующими и углеродными волокнами зависит от напряженно-деформированного состояния соединения в контактной зоне. На определение данного показателя влияет качество изготовления испытываемых образцов, способ испытания, а также расчет.

Одна из важных практических задач современного материаловедения – разработка способов управления граничными слоями. Для увеличения показателей адгезионной прочности между эпоксидным связующим и углеродными волокнами с помощью различных способов модифицируют матрицы и поверхности армирующего наполнителя.

В случае правильно выбранного способа модификации поверхности армирующего наполнителя можно увеличить физико-механические свойства композиционного материала, а также повысить ударо- и трещиностойкость изделия.

При ударе сопротивление разрушению в ПКМ происходит со стороны полимерной матрицы, а не армирующего наполнителя. Следует отметить, что при испытаниях на ударо- и трещиностойкость прочность изделия определяется свойствами граничного слоя и отвержденного связующего [13].

Для того чтобы исследовать границы раздела фаз, пользуются современными микроскопическими и спектроскопическими методами [13].

Исследования адгезионной прочности углеродного волокна с полимерными связующими проводятся уже достаточно давно [14–18]. В настоящее время существует много методов для определения адгезионной прочности на границе «волокно–матрица», а также разработан широкий спектр специального оборудования для изготовления и испытания образцов.

Методы исследования адгезионной прочности подразделяются на прямые и косвенные [13]. К прямым методам относятся: *pull out* и *push out*, вытягивание волокна из полимерного блока и из капли полимера, а также фрагментация волокна (рис. 1).

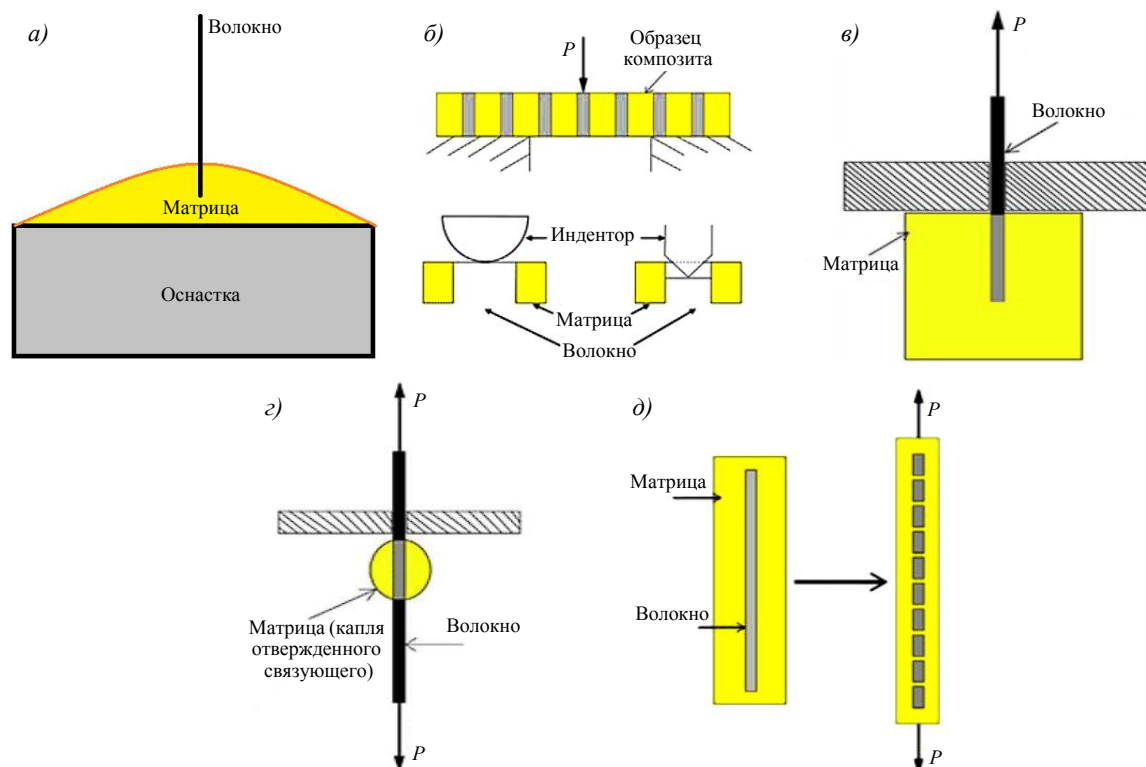


Рис. 1. Методы исследования адгезионной прочности: *pull out* (а), *push out* (б), вытягивание волокна из полимерного блока (в) и из капли полимера (г), фрагментация волокна (д) [13]

Наиболее распространенным методом для определения адгезионной прочности является метод *pull out*, который заключается в вытягивании филамента из микроблока отвержденного связующего (рис. 1, а) [15–20]. Однако, согласно работам [8, 21, 22], этот метод имеет существенный недостаток – разброс получаемых значений усложняет проведение статистической обработки данных и их интерпретацию, так как волокно имеет непостоянный диаметр, в результате чего площадь адгезионного контакта разная для каждого образца. Следует отметить, что изготовление образцов для испытания методом *pull out* – длительный и трудоемкий процесс [16–18]. Для проведения испытаний необходимо большое количество образцов, а подготовка одного образца занимает несколько часов. Кроме того, в большинстве случаев при испытании данным методом возможен как адгезионный, так и когезионный характер разрушения [18].

Для упрощения изготовления образцов и их испытаний в последнее время в Германии разработан специальный прибор, который действительно снижает трудоемкость процесса [16, 17]. Однако для проведения испытаний также требуется значительное количество образцов для набора статистических данных и их дальнейшей обработки. Отличительная особенность этого метода – формирование адгезионного контакта между углеродным волокном и полимерным связующим происходит без приложения давления, но определение площади контакта требует дополнительного анализа.

Углеродные волокна поставляются преимущественно в виде жгутов, поэтому для определения адгезионной прочности связи между матрицей и волокном применяют метод *full pull out*, в котором жгут из волокон вытягивают из блока связующего. Для

данного вида испытания требуется особая оснастка, а усилие вытягивания зависит от глубины погружения жгута из волокон в полимерное связующее [12].

Существует еще один широко распространенный метод исследования адгезионной прочности – *push out* (рис. 1, б) [13, 23], в котором при испытании происходит деформация моноволокна при сжатии. Подготовка образцов для испытаний сочетает несколько разных стадий, таких как изготовление образцов из ПКМ по заданному технологическому процессу, вырезка образцов определенного размера, шлифование образцов, а затем проведение испытаний на выдавливание моноволокна из блока связующего.

На стадии шлифования образцов можно повредить как матрицу, так и армирующий наполнитель, поэтому особое внимание уделяется позиционированию нанодентора – его необходимо располагать таким образом, чтобы он действовал на всю площадь филамента при его вдавливании из отвержденного связующего.

Методы вытягивания элементарной нити из полимерного блока (рис. 1, в), из капли связующего (рис. 1, г), а также дробления (фрагментации) волокна в матрице (рис. 1, д) не стандартизованы, однако широко используются во всем мире для определения адгезионной прочности.

К косвенным методам определения адгезионной прочности относят испытания [13] на межслойный сдвиг (рис. 2, а), межслоевую трещиностойкость по модам I (рис. 2, б) и II (рис. 2, в)

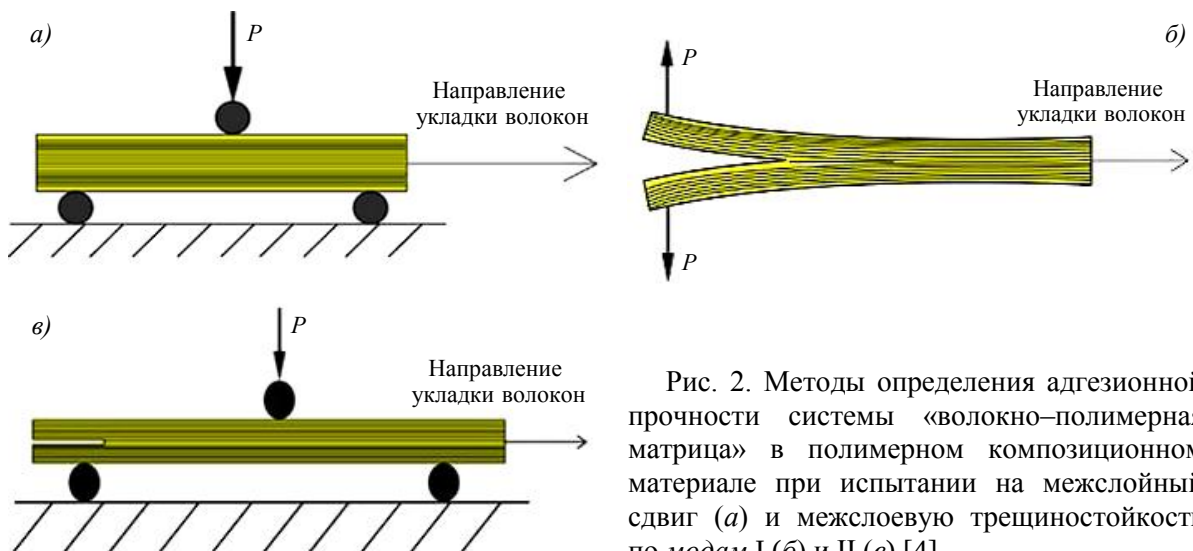


Рис. 2. Методы определения адгезионной прочности системы «волокно–полимерная матрица» в полимерном композиционном материале при испытании на межслойный сдвиг (а) и межслоевую трещиностойкость по модам I (б) и II (в) [4]

Метод определения свойств при испытании на межслойный сдвиг подразумевает изгиб образца с определенным соотношением длины и толщины. Однако данный метод не характеризует адгезионную прочность между волокном и матрицей в полной мере, потому что при испытании возникают и другие деформации помимо сдвига.

Испытание на межслоевую трещиностойкость заключается в исследовании распространения трещины по модам I (рис. 2, б) и II (рис. 2, в). При изготовлении образцов для данных методов испытания между слоями препрега закладывается дефект. Главное отличие между испытаниями по модам I и II – направление приложения нагрузки к образцам. При испытании по моде I происходит растяжение в разрывной машине. В случае испытания по моде II изгибающее напряжение прикладывается по центру образца, установленного на двух опорах. Следует отметить, что точка, в которой осуществляется приложение нагрузки, имеет важное значение, так как впоследствии необходимо правильно интерпретировать полученные данные.

Согласно работам [13, 22, 23], при испытаниях образцов основную нагрузку воспринимает матрица, а не армирующий наполнитель, поэтому данные методы определения адгезионной прочности системы «волокно–матрица» считаются косвенными.

Теоретические методы расчета адгезионной прочности постоянно совершенствуются [24, 25]. Так, процесс адгезионного разрушения анализируют с помощью метода конечных элементов [26], однако предпочтение всегда отдается экспериментальным данным.

Следует отметить, что применяются и другие методы определения адгезионной прочности между углеродным волокном и матрицей. Например, существует метод вытягивания углеродного волокна из «узла» [27, 28]. Данный метод использовался для испытания арамидных волокон. Показано, что адгезионная прочность для системы «эпоксидное связующее–арамидное волокно» (типа СВМ и Армос) приближается к когезионной прочности самих волокон, что позволяет использовать их для формирования узла при испытании других типов волокон. Однако в случае с углеродным волокном потребовалась модификация данного метода из-за особенностей свойств углеродного волокна. При испытании образцов согласно методу, приведенному в статьях [27, 28], происходит разрушение не адгезионной связи, а углеродного жгута из-за его высокого модуля упругости.

Цель данной работы:

- модификация существующего метода определения адгезионной прочности вытягиванием из «узла» с целью устранения существенных недостатков данного метода;
- определение адгезионной прочности между отечественными углеродными волокнами и эпоксидным связующим с помощью данного метода.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали отечественные углеродные волокна марок UMT42S-3K-EP (далее – УВІ) и UMT49S-12K-EP (далее – УВІІ) производства ООО «Алабуга-Волокно». В качестве эпоксидной матрицы использовано связующее ВСЭ-30, разработанное в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Основные свойства связующего и углеродных волокон приведены в табл. 1 и 2.

В качестве вспомогательного материала использован жгут Русар-НТ – волокно третьего поколения с рекордными показателями прочности среди современных арамидных нитей [29]. Основные свойства арамидного волокна приведены в табл. 3.

Таблица 1

**Основные свойства и характеристики связующего ВСЭ-30
(согласно ТУ 1-595-12-1451–2015)**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств
Время гелеобразования, мин	60	30
Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с: связующего отвердителя	25±1 25±1	1,5–3,0 0,005–0,015
Температура стеклования отвержденного связующего, °С	–	Не менее 110
Время сохранения кажущейся вязкости связующего по Брукфильду менее 1 Па·с, мин	25±1	90
Температура отверждения, °С	–	120

Таблица 2

**Свойства углеродных волокон УВІ (согласно СТО-30371716-004–2017)
и УВІІ (согласно СТО-30371716-006–2017)**

Свойства	Номинальные значения для углеродного волокна	
	УВІ	УВІІ
Прочность при растяжении комплексной нити в микропластике, ГПа (не менее)	4,2	4,9
Модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике, ГПа	240–270	250–270
Удлинение при разрыве комплексной нити в микропластике, % (не менее)	1,5	1,8
Номинальная линейная плотность нити с аппретом, текс	190	770
Плотность волокна, г/см ³	1,78±0,03	1,78±0,03
Массовая доля аппрета на нити, %	1,0–1,7	1,0–1,6

Таблица 3

**Основные свойства арамидного волокна Русар-НТ
(согласно ТУ 2272-014-18059169–2015)**

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см ³	1,45
Удельная разрывная нагрузка нити, сН/текс	290
Прочность при растяжении, ГПа	5,8–6
Модуль упругости, ГПа	165–175
Линейная плотность, текс	60

Для определения физико-механических свойств ПКМ использована стандартная разрывная машина с максимальным усилием 5 кН. Образцы испытывали в стандартных условиях по температуре и влажности.

Поверхность разрушения по границе раздела исследована с помощью оптического микроскопа.

Экспериментальная часть

Используемый метод испытания заключается в вытягивании углеродного жгута из адгезионной ячейки, которая формируется на испытываемом образце посредством затягивания на капле связующего, нанесенного на углеродное волокно, арамидного жгута с усилием 2,0 МПа. Одним из преимуществ данного метода является то, что в отличие от методов *pull out* и *push out* при испытании изготовленного образца происходит разрушение адгезионной связи между множеством элементарных волокон, что приближает данный метод к реальным условиям разрушения в ПКМ. Это позволяет сократить количество испытываемых образцов, необходимых для набора данных и проведения статистического расчета [28].

Схема формирования адгезионной ячейки представлена на рис. 3. Существующий метод вытягивания из «узла» усовершенствовали следующим образом:

– углеродный жгут пропускали через ванну с термореактивным эпоксидным связующим и наматывали на специальные рамки с заданной на пульте управления скоростью;

- для формирования адгезионной ячейки на пропитанный углеродный жгут, намотанный на рамку, наносили каплю того же связующего;
- далее затягивали узел из арамидного волокна согласно рекомендациям, которые приведены в научно-технической литературе [27, 28].

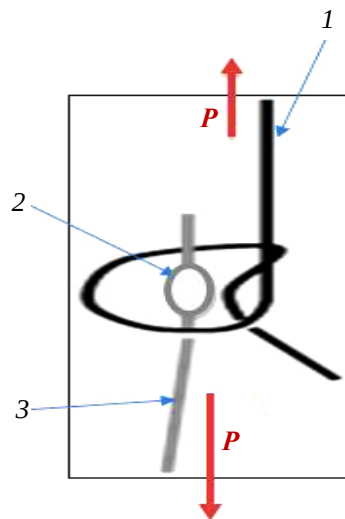


Рис. 3. Схема формирования адгезионной ячейки: 1 – арамидный жгут Русар-НТ; 2 – капля связующего; 3 – углеродное волокно

Для формирования узла использовали арамидное волокно Русар-НТ, так как оно имеет высокие прочностные показатели при растяжении, а в результате взаимодействия с эпоксидной смолой образцы на его основе демонстрируют когезионный характер разрушения вследствие диффузии связующего, как показано в работе [28]. Именно поэтому в случае применения модифицированного метода разрушение при испытании происходит на границе раздела «углеродное волокно–матрица». Для статистической обработки достаточно получения результатов испытаний выборки из 5–7 образцов.

Образцы отверждали в термошкафах согласно технологическому режиму для микропластиков на основе связующего ВСЭ-30.

По сравнению с методами *push out* и *pull out* усовершенствованный метод вытягивания из «узла» существенно проще, менее трудоемок, более технологичен. Следует отметить, что для испытания образцов требуются разрывные машины с усилием 1 кН, что также является преимуществом данного метода.

Площадь адгезионного контакта рассчитывали, исходя из объемной и линейной плотности используемых жгутов, согласно формуле (1), представленной в работе [25]:

$$S = \frac{2\pi}{\varphi} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\rho_1 \rho_2}}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – объемные плотности углеродного жгута и арамидной нити соответственно; T_1 и T_2 – линейные плотности углеродного жгута и арамидной нити соответственно; степень наполнения (упаковки) – $\varphi = 0,81\text{--}0,87$ [27, 28, 30].

Значение степени упаковки φ принимали равным 0,87 в соответствии с данными, приведенными в источнике [18].

Согласно экспериментальным данным, линейная плотность углеродных волокон УВІ составила 182 текс, а УВІІ: 767 текс. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Усилие затягивания и площадь контакта в узле для образцов с различной линейной плотностью жгутов

Параметр	Значения параметров для системы образцов							
	УВІ/Русар-НТ				УВІІ/Русар-НТ			
Условный номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	182/120	182/180	182/240	182/300	767/360	767/420	767/480	767/600
Усилие затягивания, Н	2,76	3,38	3,90	4,36	9,72	10,50	11,22	12,54
Площадь контакта в узле, мм ²	1,06	1,30	1,50	1,68	3,74	4,04	4,32	4,82

Полученные образцы с помощью клеевого состава закрепляют в накладки. На рис. 4 представлена фотография образца, помещенного в стандартную разрывную машину. Для фиксирования нагрузки использован датчик на усилие 1 кН.

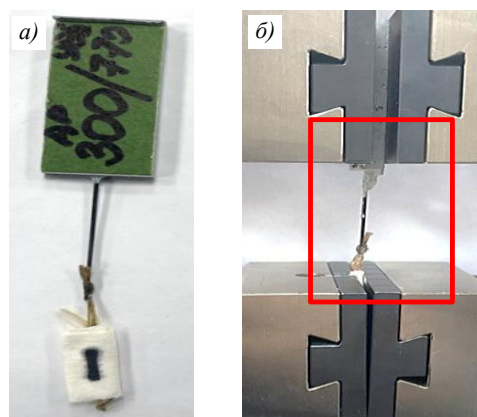


Рис. 4. Фотография образца из углеродного волокна УВІІ перед испытаниями (а) и в зажимах разрывной машины при испытании на растяжение (б)

Типичные кривые нагружения для образцов из углеродного волокна УВІ представлены на рис. 5.

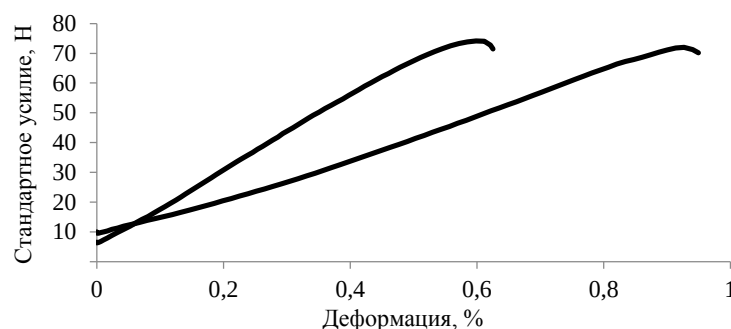


Рис. 5. Типичные кривые нагружения двух образцов из углеродного волокна УВІ с площадью контакта 1,06 мм² для системы УВІ/Русар-НТ (вариант 1, табл. 4)

Преднагрузка образца составляла 7–10 Н. По кривым нагружения отчетливо видно, что нагрузка при растяжении растет до максимального значения, затем происходит разрушение на границе адгезионного контакта и вытягивание из узла. Далее по формуле (2) рассчитывали адгезионную прочность:

$$\sigma = P/S, \quad (2)$$

где P – нагрузка, Н; S – площадь адгезионного контакта, мм^2 .

Согласно работам [27, 28], значения деформации образцов разнятся из-за начального распрямления образца, который имеет некоторое отклонение относительно направления приложения нагрузки вследствие применения арамидного жгута для формирования узла. Деформацию образца не учитывают при расчете адгезионной прочности.

На рис. 6 представлены фотографии зоны адгезионного разрушения после испытания.

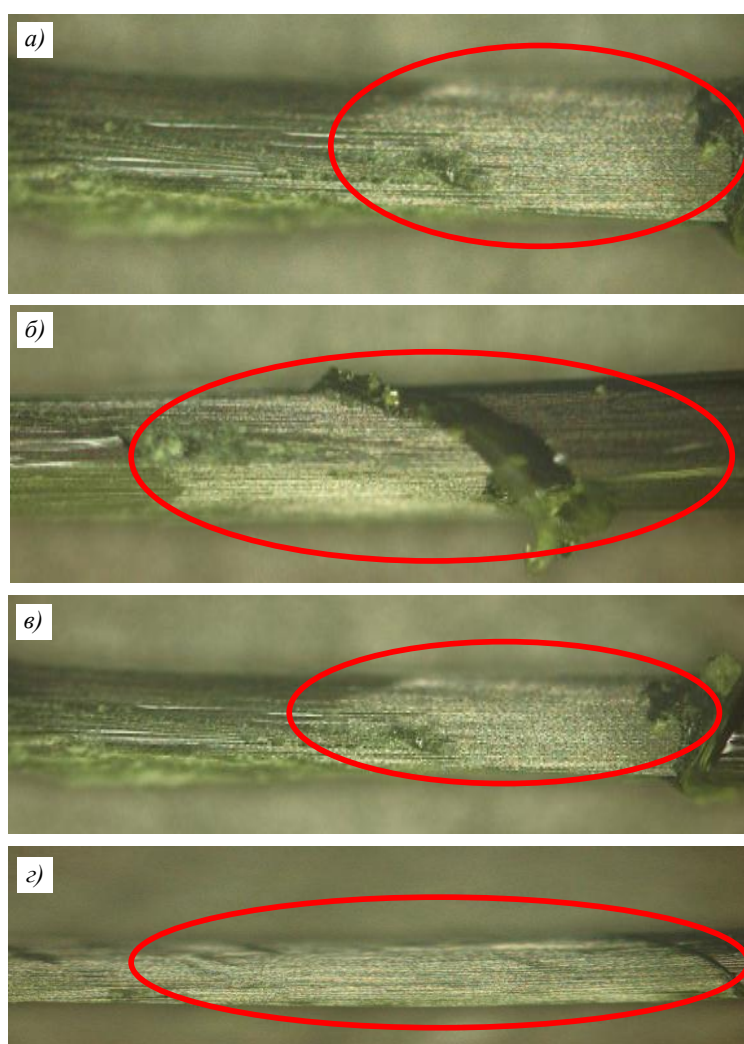


Рис. 6. Разрушение ($\times 50$) на границе раздела «углеродное волокно УВІ–матрица» с площадью контакта 1,06 (а); 1,30 (б); 1,50 (в) и 1,68 мм^2 (г)

Обсуждение и результаты

В табл. 5 и 6 приведены результаты испытаний углеродных волокон УВІ и УВІІ при различных схемах формирования адгезионной ячейки из арамидной нити.

Таблица 5

**Результаты определения адгезионной прочности углеродных волокон УВІ
с эпоксидным связующим ВСЭ-30**

Параметр	Значения параметра для системы УВІ/Русар-НТ			
Условный номер варианта	1	2	3	4
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	180/120	180/180	180/240	180/300
Площадь контакта, мм ²	1,10	1,30	1,50	1,68
Адгезионная прочность*, МПа	<u>52,8–73,7</u> 63,3	<u>58,8–83,2</u> 73,3	<u>58,1–84,7</u> 73,4	<u>53,5–75,8</u> 66,1
*В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.				

На рис. 7 представлена диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВІ с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта.

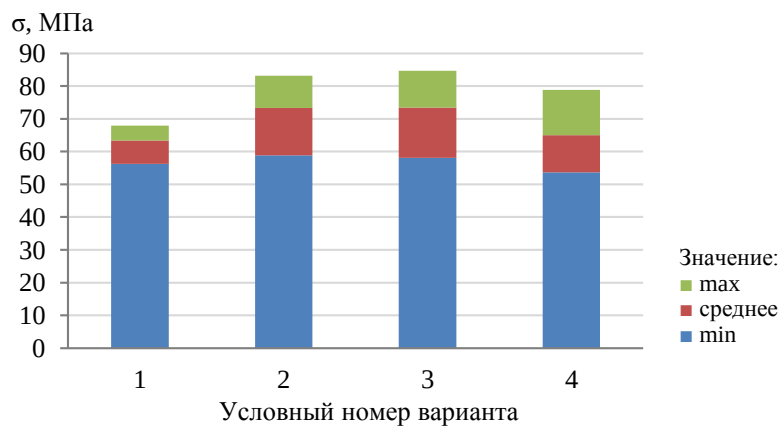


Рис. 7. Диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВІ с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта

Отметим, что максимальные значения адгезионной прочности имеют образцы с близкими значениями линейной плотности. Разница между средними значениями адгезионной прочности для разных систем находится в пределах 15 %.

Таблица 6

**Результаты определения адгезионной прочности углеродных волокон УВІІ
с эпоксидным связующим ВСЭ-30**

Параметр	Значения параметра для системы УВІІ/Русар-НТ			
Условный номер варианта	5	6	7	8
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	767/360	767/420	767/480	767/600
Площадь контакта, мм ²	3,74	4,04	4,32	5,18
Адгезионная прочность*, МПа	<u>55,5–73,1</u> 62,7	<u>52,6–71,4</u> 62,6	<u>57,7–67,4</u> 62,5	<u>47,5–78,6</u> 63,9
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.				

На рис. 8 представлена диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВІІ с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта.

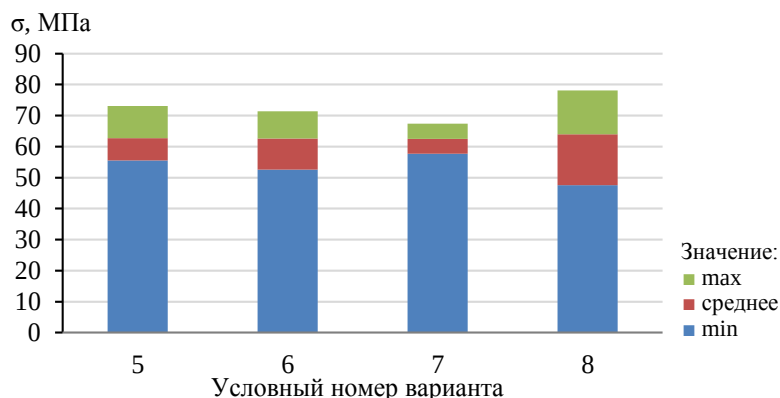


Рис. 8. Диаграмма адгезионной прочности углеродного волокна УВІІ с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что средние значения адгезионной прочности отличаются для различных систем не более чем на 5 %.

Заключения

В данной работе усовершенствован метод определения адгезионной прочности вытягиванием из «узла» и получены образцы для испытаний с одновременным изготовлением микропластиков.

Для углеродного волокна УВІ среднее значение адгезионной прочности с эпоксидной матрицей находится в интервале от 63,3 до 74,4 МПа, для углеродного волокна УВІІ – в интервале от 62,6 до 66,2 МПа.

Авторами статей [19–21] проведены испытания методом выдергивания углеродного волокна из эпоксидной матрицы, отвержденной аминным отвердителем. Прочность адгезионного контакта между углеродным волокном и эпоксидной матрицей, определенная по методу *pull out*, составляет 48–81 МПа [19–21]. Согласно данным статьи [31], прочность при межслойном сдвиге образца углепластика на основе связующего ВСЭ-30 и российского углеродного волокна составляет 46 МПа. Данное значение меньше, чем результаты, полученные с помощью метода вытягивания из «узла». Это может быть связано с тем, что в процессе испытания в ПКМ действуют не только сдвиговые напряжения, но и изгибающие.

Таким образом, усовершенствованный метод вытягивания из «узла» можно использовать для определения адгезионной прочности системы «углеродное волокно–эпоксидная матрица».

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. 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. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
5. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Мельников Д.А., Клименко О.Н., Славин А.В. Липкость препрегов как функция различных параметров при выкладке заготовок деталей и образцов из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
7. 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: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-61-81.
9. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.
10. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 52–54.
11. Ткачук А.И., Любимова А.С., Кузнецова П.А. Перспективы развития эпоксидных смол на растительной основе (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-8-49-64.
12. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. Гуляев А.И. Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением наноиндентирования (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
14. Жандаров С.Ф., Писанова Е.В., Довгяло В.А. Измерение адгезии углеродных и стеклянных волокон к термопластичным полимерам методом растяжения композита с единичным волокном // Пластические массы. 1997. № 2. С. 6–8.
15. Нелюб В.А., Гуськов А.М., Белов П.А. К проектированию углепластиков на растяжение с учетом адгезии волокна к матрице // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12-1. С. 62–66.
16. Нелюб В.А. Экспериментальная оценка модуля упругости адгезионной связи системы эпоксидная матрица – углеродное волокно с металлическим покрытием // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 96–100.
17. Borodulin A.S., Nelyub V.A., Malysheva G.V. et al. Strength of the Polymer–Fiber Interface in Structural Composite Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 13. P. 2155–2159.
18. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.

19. Горбаткина Ю.А., Журавлева О.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Чеботарев В.П. Влияние молекулярной массы полисульфона на адгезию эпоксиполисульфоновых связующих к волокнам // Пластические массы. 2017. № 5–6. С. 14–17.
20. Сергеев А.Ю., Турусов Р.А., Баурова Н.И. Определение адгезионной прочности соединений на примере испытаний образцов методом выдергивания волокон из матрицы // Композиты и наноструктуры. 2017. № 1. С. 52–62.
21. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
22. Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Сутубалов А.И., Попкова Е.А., Горбовец М.А. Методики механических испытаний по определению прочности углеродных волокон // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
23. Гуляев А.И., Ерасов В.С., Орешко Е.И., Уткин Д.А. Анализ разрушения углепластика при выталкивании мультифиламентного цилиндра // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 1. С. 28–35.
24. Hardiman M., Vaughan T.J., McCarthy C.T. The effect of fibre constraint in the nanoindentation of fibrous composite microstructures: A finite element investigation // Computational Materials Science. 2012. Vol. 64. P. 162–167.
25. Hu Z., Farahikia M., Delfanian F. Fiber bias effect on characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites by nanoindentation testing and modeling // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. P. 3359.
26. Bechel V.T., Sottos N.R. A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber push-out tests // Composites Science and Technology. 1998. Vol. 58. P. 1727–1739.
27. Котомин С.В., Обидин И.М., Павлючкова Е.А. Расчет прочности адгезионной связи армирующих волокон с полимерами по методу «петли» // Механика композитных материалов. 2022. Т. 58. № 1. С. 197–212.
28. Котомин С.В., Обидин И.М., Павлючкова Е.А. Масштабный фактор при испытании адгезионно-клеевых соединений гетероарамидных нитей методом «петли» // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 11. С. 35–40.
29. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е. и др. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 43–46.
30. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
31. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.

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. 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 fiberglass laminates for aviation and rocketry products. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
4. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.

5. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Khrulkov A.V., Donetsky K.I., Melnikov D.A., Klimenko O.N., Slavin A.V. Prepreg tack as a function of various parameters during laying out blanks of parts and samples from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
7. 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: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-61-81.
9. Veshkin E.A. *Technologies for non-autoclave molding of low-porosity polymer composite materials and large-sized structures made from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 146 p.
10. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N. et al. Promising polymer materials for structural composite products with energy-efficient molding mode. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 3–4, pp. 52–54.
11. Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Kuznetsova P.A. Opportunities of the development of plant-based epoxy resins (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-8-49-64.
12. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. Gulyayev A.I. Fiber-matrix adhesion strength measurement using nanoindentation (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
14. Zhandarov S.F., Pisanova E.V., Dovgyalo V.A. Measuring the adhesion of carbon and glass fibers to thermoplastic polymers by stretching a composite with a single fiber. *Plasticheskie massy*, 1997, no. 2, pp. 6–8.
15. Nelyub V.A., Guskov A.M., Belov P.A. Towards the design of carbon fiber reinforced plastics for tension taking into account the adhesion of the fiber to the matrix. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2014, no. 12-1, pp. 62–66.
16. Nelyub V.A. Experimental assessment of the modulus of elasticity of the adhesive bond of the epoxy matrix – carbon fiber with metal coating system. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 96–100.
17. Borodulin A.S., Nelyub V.A., Malysheva G.V. et al. Strength of the Polymer–Fiber Interface in Structural Composite Materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 13, pp. 2155–2159.
18. Gorbatkina Yu.A. *Adhesive strength in polymer-fiber systems*. Moscow: Khimiya, 1987, 192 p.
19. Gorbatkina Yu.A., Zhuravleva O.A., Ivanova-Mumzhieva V.G., Chebotarev V.P. The influence of the molecular weight of polysulfone on the adhesion of epoxy polysulfone binders to fibers. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 5–6, pp. 14–17.
20. Sergeev A.Yu., Turusov R.A., Baurova N.I. Determination of the adhesive strength of joints using the example of testing samples by pulling fibers out of the matrix. *Kompozity i nanostruktury*, 2017, no. 1, pp. 52–62.
21. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.

22. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I., Popkova E.A., Gorbovets M.A. Methods of mechanical testing to determine the strength of carbon fibers. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
23. Gulyaev A.I., Erasov V.S., Oreshko E.I., Utkin D.A. Analysis of the destruction of carbon fiber when pushing out a multifilament cylinder. *Plasticheskie massy*, 2021, no. 1, pp. 28–35.
24. Hardiman M., Vaughan T.J., McCarthy C.T. The effect of fibre constraint in the nanoindentation of fibrous composite microstructures: A finite element investigation. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 64, pp. 162–167.
25. Hu Z., Farahikia M., Delfanian F. Fiber bias effect on characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites by nanoindentation testing and modeling. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, p. 3359.
26. Bechel V.T., Sottos N.R. A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber push-out tests. *Composites Science and Technology*, 1998, vol. 58, pp. 1727–1739.
27. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Calculation of the strength of the adhesive bond of reinforcing fibers with polymers using the «loop» method. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 197–212.
28. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Scale factor when testing adhesive-adhesive joints of heteroaramid threads using the «loop» method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 35–40.
29. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Chernykh T.E. et al. Third generation aramid fibers Rusar NT for reinforcing organotextolites for aviation purposes. *Plasticheskie massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–46.
30. Perepelkin K.E. *Reinforcing fibers and fibrous polymer composites*. St. Petersburg: Scientific principles and technologies, 2009, 380 p.
31. Donetskii K.I., Karavayev R.Yu., Raskutin A.Ye., Dun V.A. Carbon fibers composite material on the basis of volume reinforcing triax braiding preforms. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.

Информация об авторах

Иваньков Роман Русланович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Сидорина Александра Игоревна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Котомин Сергей Владимирович, профессор, д.х.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Information about the authors

Roman R. Ivankov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Aleksandra I. Sidorina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Kotomin, Professor, Doctor of Science (Chem.), Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.09.2025.

The article was submitted 05.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 01.09.2025.

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