

№3
(145)
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

№ 3 (145) март 2025

Учредитель периодического издания:

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакционный совет

Председатель совета – главный редактор:

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

Заместитель председателя совета – заместитель главного редактора:

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

Члены совета:

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

Издатель: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

Редакция:

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

Адрес редакции:

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

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

Распространяется бесплатно посредством информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

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

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

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

ТРУДЫ ВИАМ

TRUDY VIAM

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

СОДЕРЖАНИЕ

Легкие сплавы

Добрынин Д.А., Павлова Т.В. Электролитно-плазменное полирование деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки ВАС1. Часть 2

Асташкин А.И., Бабанов В.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние режимов гомогенизации слитков и термической обработки листов из сплава В95оч-Т2 на их структуру и свойства

Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование термомеханических параметров горячей и теплой прокатки титанового сплава типа ВТ23

Полимерные материалы

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

Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф., Демина А.С., Соловьева Н.А., Морозов Б.Б., Шулдешова П.М., Филатов А.А. Антифрикционные и конструкционные органопластики для элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого

Композиционные материалы

Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона

CONTENTS

Light-metal alloys

3 **Dobrynin D.A., Pavlova T.V.** Electrolyte-plasma polishing of parts made by selective laser sintering from metal powder composition of aluminum alloy grade VAS1. Part 2

12 **Astashkin A.I., Babanov V.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A.** Influence of homogenization modes of ingots and heat treatment of sheets from alloy V95och-T2 on their structure and properties

23 **Yashin M.S., Kapitanenko D.V.** Investigation of thermo-mechanical parameters of hot and warm rolling of titanium alloy VT23 type

Polymer materials

33 **Khrulkov A.V., Donetsk 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

47 **Kulagina G.S., Nasonov F.A., Zhelezina G.F., Demina A.S., Solovyeva N.A., Morozov B.B., Shuldeshova P.M., Filatov A.A.** Antifriction and constructional organoplastics for elements of designs of airplanes of development Sukhoi design bureau

Composite materials

60 **Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G.** Influence of technological modes of manufacture on properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone

Бутузов А.В., Семина А.В. Предкерамические полимеры для производства керамических изделий путем фотополимеризации в ванне. Часть 1. Способы получения и свойства

70 **Butuzov A.V., Semina A.V.** Preceramic polymers for the production of ceramic products by vat photopolymerization. Part 1. Methods of production and properties

Старцев В.О., Старцев О.В., Павлов М.Р., Нечаев А.А. Прочность и влагостойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 на начальной стадии натурального и ускоренного старения

89 **Startsev V.O., Startsev O.V., Pavlov M.R., Nechaev A.A.** Strength and moisture resistance of fiberglass plastic VPS-53/T-25 at the initial stage of natural and accelerated aging

Испытания материалов

Material tests

Ерасов В.С., Сибеев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания на срез конструкционных авиационных материалов и покрытий

101 **Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I.** Slice testing of structural aviation materials and coatings

Научная статья

УДК 669.018.95:621.791.724

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

ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ ВАС1. Часть 2

Д.А. Добрынин¹, Т.В. Павлова¹

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

Аннотация. Изучено влияние добавок в базовом электролите, рабочего напряжения и температуры электролита на качество процесса электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки ВАС1. Проведено электролитно-плазменное полирование конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн». Разработана технология электролитно-плазменного полирования деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки ВАС1.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, электролитно-плазменное полирование, 3D-печать, селективное лазерное сплавление, металлопорошковая композиция, алюминиевый сплав марки ВАС1, конструктивно-подобный образец

Для цитирования: Добрынин Д.А., Павлова Т.В. Электролитно-плазменное полирование деталей, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава марки ВАС1. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-3-11.

Scientific article

ELECTROLYTE-PLASMA POLISHING OF PARTS MADE BY SELECTIVE LASER SINTERING FROM METAL POWDER COMPOSITION OF ALUMINUM ALLOY GRADE VAS1. Part 2

D.A. Dobrynin¹, T.V. Pavlova¹

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 additives in the base electrolyte, operating voltage and temperature of the electrolyte on the quality of the process of electrolyte-plasma polishing of parts manufactured by selective laser sintering from a metal powder composition of aluminum alloy grade VAS1 was studied. Electrolyte-plasma polishing of a structurally similar sample of a «bracket» type part was carried out. A technology has been developed for electrolyte-plasma polishing of parts manufactured by the selective laser sintering method from metal powder composition aluminum alloy grade VAS1.

Keywords: electrochemical treatment, electrolyte-plasma polishing, 3D-printing, selective laser sintering, metal powder composition, aluminum alloy grade VAS1, structurally similar sample

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 12 (130), 2023.

For citation: Dobrynin D.A., Pavlova T.V. Electrolyte-plasma polishing of parts made by selective laser sintering from metal powder composition of aluminum alloy grade VAS1. Part 2. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-3-11.

Введение

Использование 3D-печати для изготовления деталей из металлопорошковой композиции (МПК) [1–4] требует современных способов постобработки [5–7]. В первой части данной статьи описаны традиционные (механический, химический и электрохимический) способы постобработки деталей [8, 9], полученных в процессе 3D-печати из МПК методом селективного лазерного сплавления (СЛС). Описаны основные преимущества и недостатки этих способов уменьшения шероховатости поверхности. В качестве альтернативы рекомендован способ электролитно-плазменного полирования (ЭПП) поверхности, который является более высокопроизводительным и менее токсичным.

Разработан базовый состав раствора для ЭПП образцов, полученных в процессе 3D-печати из МПК алюминиевого сплава марки VAS1 методом СЛС. Показано, что ЭПП приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности R_a как минимум в 5 раз, образцы после постобработки имели светлую матовую поверхность.

Исследовано влияние содержания базового компонента в растворе на результат ЭПП образцов. При содержании базового компонента в растворе от 30 до 40 г/л наблюдается хорошее качество постобработки.

Во второй части данной статьи представлены результаты исследования влияния на качество ЭПП образцов из сплава VAS1 добавок в базовом растворе, температуры раствора и напряжения между электродами в электролитической ванне.

Материалы и методы

Для исследований использовали образцы в виде брусков (12×12×63 мм) и пластин (100×50×3 мм). Элементный состав сплава VAS1 представлен в табл. 1. Плотность сплава составила 2,66 г/см³.

Таблица 1

Элементный состав сплава марки VAS1*

Содержание элементов, % (по массе)						Содержание примесей, % (по массе), не более			
Al	Si	Mg	Cu	Zr	Ce	Fe	Ni	прочие	
								каждой	сумма
Основа	8,5–11,5	0,35–0,90	0,4–1,0	0,15–0,35	0,10–0,35	0,20	0,05	0,05	0,10

* Защищено патентом РФ № 2661525.

Для ЭПП образцов использовали лабораторную установку, состоящую из емкости для раствора, chillera и тэнов, источника тока, пульта управления, системы очистки и автоматического поддержания температуры раствора.

Среднее арифметическое отклонение профиля R_a (шероховатость поверхности) определяли с помощью контактного профилометра.

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

Результаты и обсуждение

В работах [10–12] приведены составы многокомпонентных растворов для ЭПП деталей из сплавов на основе алюминия. Вторым компонентом таких растворов является

органическая (щавелевая или лимонная) или неорганическая кислота (соляная). Согласно источникам, концентрация кислоты в растворе может составлять до 30 г/л.

Для исследования влияния добавки на качество ЭПП образцов приготовлены растворы, содержащие 30 г/л базового компонента и 10 г/л кислоты. Выполнено ЭПП образцов при напряжении между электродами 340 В и температуре раствора до 85 °С. Продолжительность ЭПП составила 10 мин. Результаты ЭПП образцов в растворе с кислотой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние добавок в растворе на результаты электролитно-плазменного полирования	
Добавка	Результат обработки
Щавелевая кислота ($C_2H_2O_4$)	Белый налет (смывается водой), поверхность в мелком питтинге
Лимонная кислота ($C_6H_8O_7$)	Повышение отражающего эффекта на поверхности (мутный блеск)
Соляная кислота (HCl)	Светлая выглаженная поверхность, имеются участки с темным шламом и питтинги разного размера

Добавление лимонной кислоты в базовый электролит приводит к повышению отражающего эффекта на обработанной поверхности образца, которая становится выглаженной и приобретает мутный блеск. Однако при обработке образца более 20 мин в выбранном составе электролита и при предложенном режиме на поверхности образовались точечные питтинги, имеющие вид дефектов, которые возникают от эрозионного воздействия при ЭПП при высоком напряжении между электродами (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид образца до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования в растворе с добавкой лимонной кислоты (продолжительность обработки 30 мин)

По этой причине рекомендовано уменьшить напряжение между электродами до 320 В [13, 14]. Это способствовало повышению качества ЭПП – поверхность образцов стала выглаженной с мутным блеском без питтингов (табл. 3).

Высокая температура электролита обеспечивает низкие значения плотности тока, что позволяет обрабатывать крупногабаритные детали на маломощном оборудовании. Но высокие значения температуры электролита в свою очередь приводят к его интенсивному испарению и быстрой выработке. Так, при ЭПП одного образца площадь обрабатываемой поверхности не превышает 25 см², в ванне с 4 л электролита при выбранном режиме и составе электролита продолжительность выработки раствора составляет до 15 мин, выработанный электролит имеет темно-коричневый цвет. При обработке в выработанном электролите более 15 мин происходит оседание травильного шлама на образце, поверхность становится темной, происходит травление граней и сторон образца, опущенных в раствор, с образованием глубоких питтингов.

Изучено влияние температуры (до 85 °С) раствора на качество ЭПП при напряжении между электродами 320 В, содержании базового вещества и лимонной кислоты в растворе 30 и 10 г/л соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Влияние температуры раствора электролита на результаты электролитно-плазменного полирования (ЭПП) образцов

Температура раствора, °С	Результат ЭПП	Внешний вид образца после ЭПП
От 80 до 85 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском, питтинги отсутствуют	
От 70 до 80 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском, качество ЭПП визуальное ухудшается (поверхность имеет более шероховатый вид)	
От 60 до 70 °С	Поверхность выглаженная с мутным блеском. Качество поверхности сравнимо с результатом, полученным при температуре электролита от 70 до 80 °С, однако присутствуют неглубокие питтинги, отчетливо заметные на гранях образца	
От 50 до 60 °С	Продолжительность процесса 10 мин, дальнейшая обработка нецелесообразна ввиду низкого качества поверхности (на образцах имеется серый шлам, поверхность в мелком питтинге)	

Таким образом, для ЭПП деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС, можно рекомендовать растворы с температурой от 70 до 85 °С. Следует отметить, что при более низкой температуре уменьшается интенсивность парообразования и уноса раствора из рабочей ванны, но при этом снижается качество ЭПП, и наоборот, при более высокой температуре электролита увеличивается интенсивность парообразования и уноса раствора из рабочей ванны, но при этом повышается качество ЭПП.

Проведено ЭПП образцов в виде пластин при напряжении между электродами от 260 до 320 В в растворе, содержащем 30 г/л базового компонента и 10 г/л лимонной кислоты, при температуре до 85 °С (табл. 4). Выбор образцов в виде пластин обусловлен влиянием геометрической формы на рабочий режим и качественный результат процесса ЭПП.

Таблица 4

Влияние напряжения между электродами на результаты электролитно-плазменного полирования (ЭПП) образцов

Напряжение между электродами, В	Результат ЭПП
320	Поверхность выглаженная, на образцах присутствуют питтинги, имеющие вид дефектов, возникающих от эрозионного воздействия при ЭПП при высоком рабочем напряжении
300	Поверхность выглаженная, уменьшается площадь поверхности, покрытой питтингами
280	Уменьшение питтингообразования, качество обработки значительно улучшается
260	Поверхность выглаженная, на образцах отсутствуют питтинги. Понижение напряжения между электродами до 250 В и менее вызывает разогрев образца, при ЭПП возможно оплавление граней

Внешний вид образца в виде пластины до и после ЭПП в растворе с лимонной кислотой при напряжении между электродами 260 В и температуре раствора до 85 °С приведен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образца в виде пластины до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования при напряжении между электродами 260 В. На образце после обработки оплавился угол в месте контакта образца с подвесом

Определено среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a (шероховатость поверхности) при напряжении между электродами 260 и 320 В и продолжительности ЭПП 30 мин (табл. 5).

Таблица 5

**Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a
в зависимости от продолжительности электролитно-плазменного
полирования (ЭПП) образцов в виде пластин**

Продолжительность ЭПП, мин	Отклонение профиля поверхности R_a , мкм, при напряжении между электродами, В	
	320	260
0	<u>41,67; 46,58; 48,65</u> 45,63	<u>46,77; 44,49; 41,69</u> 44,32
5	<u>17,05; 17,73; 18,21</u> 17,66	<u>14,23; 15,57; 14,65</u> 14,82
10	<u>14,11; 14,46; 14,82</u> 14,46	<u>11,39; 12,01; 11,48</u> 11,63
20	<u>11,75; 11,87; 12,04</u> 11,89	<u>9,16; 9,27; 9,19</u> 9,21
30	<u>9,69; 10,86; 8,49</u> 9,68	<u>7,04; 7,53; 7,28</u> 7,28
Примечание. В числителе указаны измеренные значения, в знаменателе – среднее.		

Значение среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a для образца, подвергнутого ЭПП в течение 30 мин при напряжении между электродами 320 В, изменилось с 45,63 до 9,68 мкм, в среднем в 4,7 раза (или на 78,8 % относительно исходного значения), при напряжении 260 В – от 44,32 до 7,28 мкм, в среднем в 6,1 раза (или на 83,6 % относительно исходного значения).

Таким образом, для ЭПП образцов, не требующих декоративного блеска, применимы растворы с содержанием основного компонента от 30 до 40 г/л. Для декоративной отделки с получением поверхности с мутным блеском применимы растворы с содержанием основного вещества 30 г/л и лимонной кислоты 10 г/л. Температура раствора должна составлять до 85 °С, напряжение между электродами – от 260 до 320 В. При этом напряжение между электродами и состав раствора необходимо выбирать на стадии отработки технологии для конкретной детали, так как ее геометрические размеры и технология 3D-печати оказывают значительное влияние на режим ЭПП.

Следует отметить, что для повышения качества электрохимической обработки часто применяют двухатомные (холодные методы) и трехатомные (горячие методы) спирты [15]. Поскольку ЭПП является горячим процессом, авторы работ [10–12] рекомендуют для улучшения равномерности обработки деталей из сплавов на основе алюминия применять глицерин ($C_3H_8O_3$) в количестве от 5 до 10 г/л. Однако электролиты с органическими добавками при высоких температурах и напряжениях между электродами подвержены разложению, поэтому в процессе ЭПП требуется полная замена электролита после его выработки, что нецелесообразно с экономической точки зрения. Такие электролиты можно использовать для разовой обработки не крупногабаритных деталей в небольших объемах рабочего раствора, где отработанный электролит после обработки подлежит утилизации.

Поэтому от использования электролитов с добавками лимонной кислоты и глицерина для ЭПП крупногабаритных деталей, таких как конструктивно-подобные образцы (КПО) деталей типа «Кронштейн», изготовленных методом 3D-печати из МПК сплава ВАС1, предложено отказаться. Для КПО детали типа «Кронштейн» ЭПП проводили в растворе с содержанием основного вещества 30 г/л при температуре до 85 °С и напряжении между электродами 260 В. Внешний вид КПО детали типа «Кронштейн» до и после ЭПП представлен на рис. 3. Значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a КПО детали типа «Кронштейн» в зависимости от продолжительности ЭПП приведены в табл. 6.

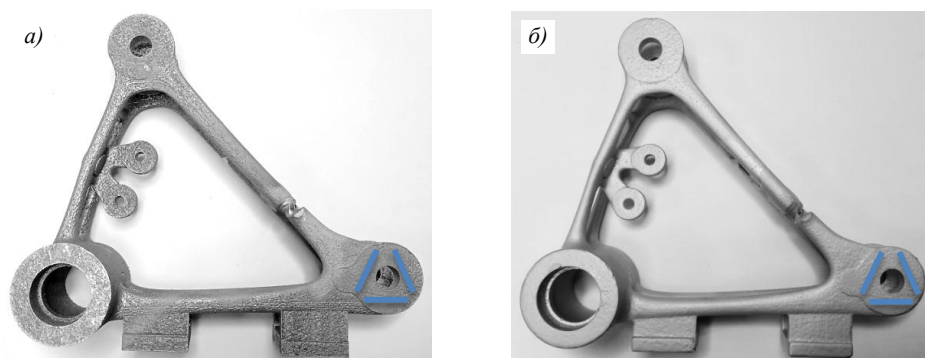


Рис. 3. Внешний вид конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн» до (а) и после (б) электролитно-плазменного полирования при напряжении между электродами 260 В. Линиями обозначены места замера значения R_a

Таблица 6

Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a в зависимости от продолжительности электролитно-плазменного полирования (ЭПП) конструктивно-подобного образца детали типа «Кронштейн»

Продолжительность ЭПП, мин	Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a , мкм
0	<u>43,97; 46,21; 44,83</u> 45,01
5	<u>15,61; 16,39; 15,94</u> 15,68
10	<u>12,76; 13,88; 12,53</u> 13,06
20	<u>10,64; 11,05; 10,81</u> 10,83
30	<u>8,85; 8,79; 8,63</u> 8,76
Примечание. В числителе указаны измеренные значения, в знаменателе – среднее. Измерение проводили на трех областях поверхности конструктивно-подобного образца в районе отверстия для крепежа, расположенного рядом с поддержкой (см. рис. 3).	

На основании полученных результатов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология ЭПП поверхности деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС.

Заключения

Исследовано влияние второго компонента (лимонной кислоты) в базовом электролите на качество ЭПП деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС. Добавление лимонной кислоты в количестве 10 г/л в базовый электролит приводит к усилению отражающего эффекта на обработанной поверхности, которая приобретает мутный блеск и выглаженный вид.

Изучено влияние температуры раствора на качество ЭПП поверхности образцов. Для ЭПП деталей можно рекомендовать растворы с температурой от 70 до 85 °С.

Установлено, что геометрическая форма образцов и деталей влияет на напряжение между электродами и качественный результат процесса ЭПП. Для ЭПП деталей, не требующих декоративного блеска, можно применять растворы с содержанием основного компонента от 30 до 40 г/л, для декоративной отделки с получением мутного блеска поверхности – растворы на основе базового компонента (30 г/л) с добавкой лимонной кислоты (10 г/л). Температура раствора в обоих случаях составляет 85 °С, напряжение между электродами – от 260 до 320 В.

Проведено ЭПП КПО детали типа «Кронштейн», полученного в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности R_a КПО после ЭПП уменьшилось как минимум в 5 раз.

Разработана технология ЭПП поверхности деталей, полученных в процессе 3D-печати из МПК сплава ВАС1 методом СЛС.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электрометаллургия. 2022. № 1. С. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // Электрометаллургия. 2022. № 4. С. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // Электрометаллургия. 2022. № 5. С. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Неруш С.В., Свиридов А.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Тарасов С.А. Разработка технологии пайки деталей, полученных аддитивными технологиями, из металлопорошковой композиции на основе кобальта // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.

7. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю., Воробьев Н.Н. Вопрос создания физических и математических моделей тепло- и массопереноса при изготовлении деталей методом аддитивных технологий (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.
8. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник в 2 т. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.
9. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 с.
10. Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларуская Навука, 2010. 232 с.
11. Способ электролитно-плазменной обработки изделий из алюминия и алюминиевых сплавов: пат. 7291 Респ. Беларусь; заявл. 16.07.15; опубл. 28.02.17.
12. Захаров С.В., Коротких М.Т. Электролитно-плазменное полирование сложнопрофильных изделий из алюминиевого сплава Д16 // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз–Антей»*. 2017. № 3. С. 83–87.
13. Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Бойко А.Г. и др. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы // *Успехи физики металлов*. 2005. Т. 6. С. 273–344.
14. Воленко А.П., Бойченко О.В., Чиркунова Н.В. Электролитно-плазменная обработка металлических изделий // *Вектор науки ТГУ*. 2012. № 4 (22). С. 144–147.
15. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / под ред. П.М. Вячеславова. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1983. 101 с.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-1-2-12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-4-15-25.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19.
4. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
5. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
6. Nerush S.V., Sviridov A.V., Afansiev-Khodykin A.N., Galushka I.A., Tarasov S.A. Development of brazing technology for parts obtained by additive technologies from cobalt based metal powder composition. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-18-29.
7. Marakhovskij P.S., Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu., Vorobev N.N. On creation of physical and mathematical models of heat and mass transfer during manufacturing by additive technologies (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-111-119.

8. *Galvanic coatings in mechanical engineering: a reference book in 2 vols.* Ed. M.A. Shluger. Moscow: Mashinostroenie, 1985, vol. 1, 240 p.
9. Mirzoev R.A., Davydov A.D. *Anodic processes of electrochemical and chemical processing of metals: a textbook.* St. Petersburg: Publ. house of the Polytech. Univ., 2013, 382 p.
10. Kulikov I.S., Vaschenko S.V., Kamenev A.Ya. *Electrolytic-plasma processing of materials.* Minsk: Belarusian Navuka, 2010, 232 p.
11. *Method of electrolytic-plasma processing of products made of aluminum and aluminum alloys:* pat. 7291 Republic of Belarus; appl. 16.07.15; publ. 28.02.17.
12. Zakharov S.V., Korotkikh M.T. Electrolyte-plasma polishing of complex-shaped products made of aluminum alloy D16. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz–Antey»*, 2017, no. 3, pp. 83–87.
13. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N., Boyko A.G. et al. Electrolyte-plasma treatment and coating of metals and alloys. *Uspekhi fiziki metallov*, 2005, vol. 6, pp. 273–344.
14. Volenko A.P., Boychenko O.V., Chirkunova N.V. Electrolyte-plasma treatment of metal products. *Vektor nauki TGU*, 2012, no. 4 (22), pp. 144–147.
15. Grilikhes S. Ya. *Degreasing, etching and polishing of metals.* Ed. P.M. Vyacheslavov. 5th ed., rev. and add. Leningrad: Mashinostroenie, 1983, 101 p.

Информация об авторах

Добрынин Данил Аркадьевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлова Татьяна Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Tatyana V. Pavlova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.

The article was submitted 07.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.

Научная статья

УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-12-22

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ СЛИТКОВ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА В950ч-Т2 НА ИХ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

А.И. Асташкин¹, В.В. Бабанов¹, А.А. Селиванов¹, Е.А. Ткаченко¹

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

Аннотация. Приведены результаты исследования взаимосвязи микроструктуры слитков из сплава В950ч после гомогенизационного отжига по различным (одноступенчатому и двухступенчатому) режимам и параметров технологической пластичности в интервале температур 350–450 °С. Установлена зависимость от режима гомогенизации структуры и свойств листов толщиной 6 мм из сплава В950ч, состаренных по опытному и серийному (Т2) режимам старения. Выбраны режимы гомогенизационного отжига и старения, обеспечивающие достижение наиболее высокого уровня служебных характеристик листов.

Ключевые слова: алюминиевый сплав В950ч, система Al–Zn–Mg–Cu, гомогенизационный отжиг, технологическая пластичность слитков, микроструктура, механические и коррозионные свойства листов, искусственное старение

Для цитирования: Асташкин А.И., Бабанов В.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние режимов гомогенизации слитков и термической обработки листов из сплава В950ч-Т2 на их структуру и свойства // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-12-22.

Scientific article

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION MODES OF INGOTS AND HEAT TREATMENT OF SHEETS FROM ALLOY V950ch-T2 ON THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES

A.I. Astashkin¹, V.V. Babanov¹, A.A. Selivanov¹, E.A. Tkachenko¹

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 a study of the relationship between the microstructure of V950ch alloy ingots after homogenization annealing in single- and two-stage modes with the parameters of technological plasticity in the temperature range of 350–450 °C. There has been established the dependence from the homogenization mode of the structure and properties of sheets with a thickness of more than 6 mm made of V950ch alloy, aged in a new experimental mode and a serial aging mode T2. We selected the modes of homogenization annealing and aging that ensure achievement of the highest level of service characteristics of sheets.

Keywords: aluminum alloy V950ch, Al–Zn–Mg–Cu system, homogenization annealing, technological plasticity of ingots, microstructure, mechanical and corrosion properties of sheets, artificial aging

For citation: Astashkin A.I., Babanov V.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. Influence of homogenization modes of ingots and heat treatment of sheets from alloy V95och-T2 on their structure and properties. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-12-22.

Введение

Сплав В95оч/пч системы Al–Zn–Mg–Cu многие годы широко применяется в изделиях авиакосмической техники. В частности, в самолетостроении листы из сплава В95оч/пч служат одним из основных конструкционных материалов для деталей обшивок фюзеляжа и панелей крыла [1–7].

Благодаря освоению современного металлургического оборудования, оптимизации соотношения легирующих элементов в сплавах и разработке новых технологических процессов изготовления полуфабрикатов исследовательские работы по усовершенствованию структуры и свойств сплава В95оч/пч продолжают в настоящее время [8–15]. Такие подходы обеспечивают получение комплекса улучшенных служебных характеристик материала, необходимых для новых поколений изделий авиационной техники.

При изготовлении деформированных полуфабрикатов гомогенизационный отжиг слитков является первым и наиболее длительным нагревом. Параметры данного процесса существенно влияют как на технологические свойства слитков, так и на формирование зеренной структуры и комплекса эксплуатационных свойств деформированных полуфабрикатов при окончательной термической обработке (закалке и старении). Необходимо более углубленное изучение взаимосвязи температурно-временных параметров гомогенизации со структурой и свойствами материала деформированных и термически упрочненных изделий [16–21].

В данной статье приведены результаты исследования влияния серийного и опытных режимов гомогенизации и старения на структуру, технологические, механические и коррозионные свойства литых и катаных полуфабрикатов из сплава В95оч.

Материалы и методы

По серийной технологии литья в условиях металлургического производства ПАО «КУМЗ» получены слитки сечением 500×2000 мм из сплава В95оч. Исследованы темплеты, отобранные из слитков, гомогенизированных по серийному и опытным режимам в лабораторных условиях. Изучены свойства и микроструктура холоднокатаных и горячекатаных листов, полученных из опытно-промышленных слитков, гомогенизированных по серийному одноступенчатому и опытному двухступенчатому режимам.

Химический состав исследованных полуфабрикатов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав слитка из сплава В95оч (ОСТ 1 90026–80)

Содержание элементов, % (по массе)									
Основные компоненты						Примеси (не более)			
Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Fe	Si	Ni	Ti
Основа	1,6	2,6	0,3	6,1	0,1	0,12	0,03	0,01	0,03

В данной работе подходы к выбору режимов гомогенизации основаны на результатах, полученных ранее при исследовании закономерностей изменения структуры и свойств слитков из алюминиевых сплавов различных систем легирования в широком температурно-временном интервале [9–14]. Для двухступенчатых режимов гомогенизации

температура первой ступени выбрана в областях минимальной устойчивости твердых растворов основных легирующих элементов и антирекристаллизационных добавок марганца и хрома в алюминии.

Из центральной зоны по оси слитка отобраны поперечные темплеты толщиной 40 мм, которые подвергали гомогенизации по трем режимам в интервале температур 375–465 °С при заданной продолжительности выдержки:

- режим 1 – серийный одноступенчатый;
- режим 2 – опытный двухступенчатый (температура первой ступени соответствует температурному интервалу минимальной устойчивости твердого раствора марганца и хрома в алюминии, температура второй ступени идентична режиму 1 при меньшей продолжительности выдержки);
- режим 3 – опытный двухступенчатый (температура первой ступени соответствует температурному интервалу минимальной устойчивости твердого раствора цинка, магния и меди в алюминии, температура второй ступени идентична режиму 2 при увеличенной в 1,5 раза продолжительности выдержки).

Листы для исследования толщиной 6 мм изготовлены из опытно-промышленных слитков, гомогенизированных по серийному одноступенчатому режиму 1 и опытному двухступенчатому режиму 3.

Закалку листов из сплава В950ч проводили по серийному режиму (охлаждение с температуры выдержки 465 °С в воде при комнатной температуре) на горизонтальном закалочном агрегате ПАО «КУМЗ». В свежезакаленном состоянии листы подвергали правке со степенью деформации 2,0 %. Старение образцов, отобранных из закаленных и правленных листов, проводили в лабораторных условиях. При этом варьировали продолжительность выдержки на второй ступени старения, включая две выдержки, соответствующие границам временного интервала серийного режима Т2, и две выдержки по опытному режиму, с целью получения требуемого комплекса механических и коррозионных свойств. Образцы для испытаний отбирали с одного конца листа из центральной зоны по ширине.

Микроструктуру слитков и листов исследовали на шлифах с помощью металлографического микроскопа, оснащенного цифровой камерой. Для проведения количественного анализа применяли специальное программное обеспечение.

Исследования тонкой структуры образцов проводили на фольге при ускоряющем напряжении 200 кВ с применением просвечивающего электронного микроскопа с термополевым катодом типа Шоттки, оснащенного системой для рентгеноспектрального микроанализа.

Показатели технологической пластичности слитков (σ_b , δ) определяли на образцах, отобранных в поперечном направлении. Испытания на растяжение проводили в диапазоне температур от 20 до 450 °С в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84 на универсальной электромеханической машине, оснащенной термокабинетом для исследований в диапазоне температур от 20 до 500 °С. Механические свойства листов (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ_5), вязкость разрушения, усталостные характеристики, склонность к межкристаллитной и расслаивающей коррозии определяли по стандартным методикам и на стандартных образцах в соответствии с требованиями ГОСТ 1497–84, ГОСТ 9.021–74, ГОСТ 9.904–82. Испытания для определения вязкости разрушения и циклической долговечности проводили согласно ОСТ 1 90356–84 и ГОСТ 25.502–79. Вязкость разрушения определяли на образцах шириной $B = 500$ мм, циклическую долговечность – при $f = 40$ Гц, $K_t = 2,6$ и $\sigma_{max} = 157$ МПа.

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

Результаты и обсуждение

При исследовании микроструктуры слитков (рис. 1) установлено, что по сравнению со слитком в литом состоянии после гомогенизационного отжига по всем трем режимам происходит уменьшение толщины эвтектических прослоек, расположенных по границам дендритных ячеек, за счет их растворения. Как показал количественный анализ, наиболее эффективное растворение неравновесных эвтектических прослоек кристаллизационного происхождения наблюдается после гомогенизации по режиму 3 (рис. 1, ж, з). Объемная доля избыточных первичных фаз в слитке в литом состоянии составляет 6,7 % и после гомогенизации по режиму 3 уменьшается до 2,6 %, по режиму 1 – до 3,1 %, по режиму 2 – до 2,8 %.

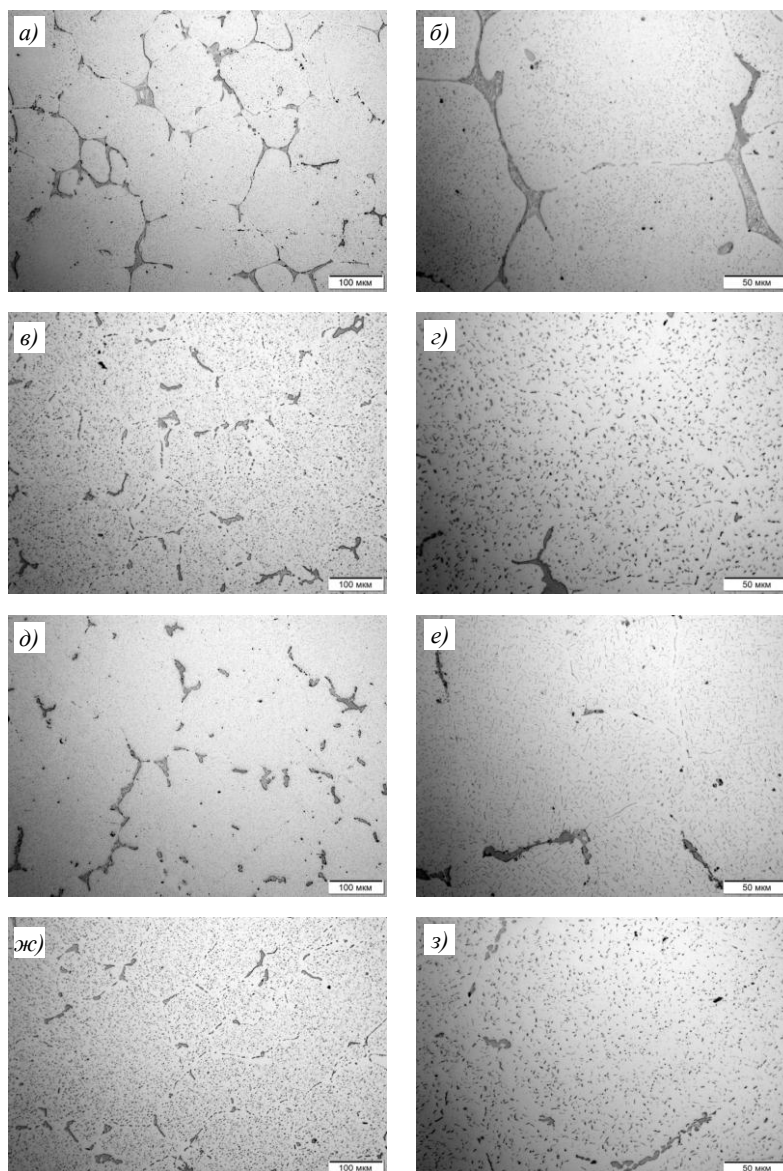


Рис. 1. Микроструктуры слитков из сплава В950сч в литом состоянии (а, б) и после гомогенизации по режиму 1 (в, г), 2 (д, е), 3 (ж, з) при увеличении $\times 200$ (а, в, д, ж) и $\times 500$ (б, г, е, з)

В большей степени объемная доля неравновесных первичных эвтектик на границах дендритных ячеек уменьшается в результате гомогенизации по режиму 3 по сравнению с другими режимами. Это обусловлено увеличением градиента концентрации

основных легирующих элементов по объему зерна в связи с более интенсивным распадом твердого раствора при выдержке в температурном интервале его минимальной устойчивости за счет выделения вторичных мелких частиц MgZn_2 .

Электронно-микроскопическое исследование (рис. 2) показало, что структура слитков из сплава В950с характеризуется распадом твердого раствора [12–14, 16, 18] как в литом состоянии, так и в результате гомогенизации по различным режимам с образованием дисперсоидов разной морфологии и размеров:

- Т-фаза ($\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$), имеющая форму пластин длиной до 600 нм с поперечным сечением до 20 нм;
- вторичные выделения η -фазы (MgZn_2).

После гомогенизации по одноступенчатому режиму 1 частицы Т-фазы имеют длину >500 нм (рис. 2, б). В слитках в литом состоянии и после гомогенизации по опытным режимам 2 и 3 наблюдается меньший размер частиц Т-фазы – до 250–300 нм (рис. 2, а, в) и 100–200 нм (рис. 2, г) соответственно. При качественной оценке в структуре слитков в литом состоянии и после гомогенизации по режиму 2 обнаружено меньшее количество выделений η -фазы (MgZn_2) по сравнению со слитками, гомогенизированными по режимам 1 и 3.

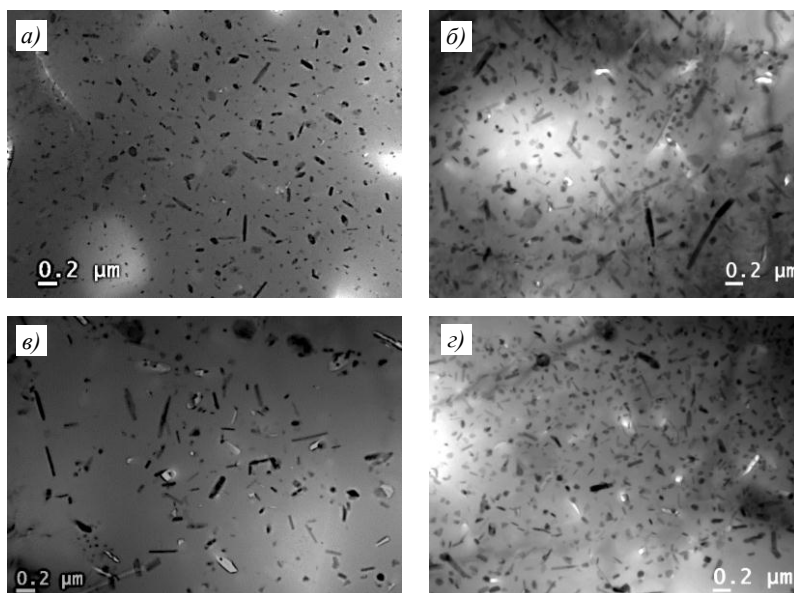


Рис. 2. Структуры слитков из сплава В950с в литом состоянии (а) и после гомогенизации по режиму 1 (б), 2 (в), 3 (г)

Независимо от режима гомогенизации сопротивление деформации слитков из сплава В950с в температурном интервале 350–430 °С практически одинаково и составляет 50–55 МПа при 350 °С, монотонно снижаясь до 30–40 МПа при повышении температуры испытаний до 450 °С (рис. 3, а).

Особенности структуры, обусловленные режимом гомогенизации, оказали более существенное влияние на технологические характеристики слитков при повышенных температурах (рис. 3, б). Установлено, что после гомогенизации по двухступенчатому режиму 3 наиболее высокие показатели технологической пластичности слитков из сплава В950с (максимальные значения относительного удлинения $\delta = 90$ –100 %) получены в температурном интервале 350–430 °С. Значения технологической пластичности слитков, гомогенизированных по серийному одноступенчатому режиму 1, при этих температурах составляют 60–85 %. Максимальные показатели технологической

пластичности слитков в литом состоянии и после гомогенизации по опытному режиму 2 достигают 75–80 % в более узком интервале температур 350–380 °С и резко снижаются до 40–50 % при повышении температуры деформации до 430 °С.

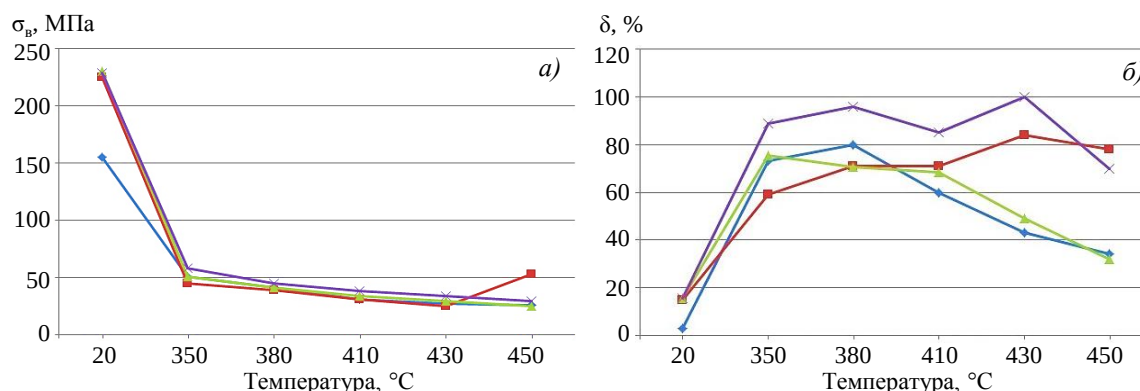


Рис. 3. Влияние температуры деформации на сопротивление деформации (а) и технологическую пластичность (б) слитка из сплава В950ч в литом состоянии (♦) и после гомогенизации по режиму 1 (■), 2 (▲), 3 (×)

Следует отметить, что при увеличении температуры деформации до 450 °С технологическая пластичность слитков, гомогенизированных по режимам 1 и 3, снижается до 70–80 %, по режиму 2 и в литом состоянии – до 30–40 %.

Исследовано влияние режима гомогенизации слитков из сплава В950ч на механические и коррозионные свойства катаных листов толщиной 6 мм в состоянии Т2. Листы изготовлены из слитков, гомогенизированных по режимам, обеспечившим наиболее высокий уровень технологической пластичности: 1 (одноступенчатый серийный) и 3 (двухступенчатый опытный). Прокатку листов в интервале температур 380–420 °С осуществляли по следующей схеме: горячая прокатка плоского слитка, обточенного до толщины 465 мм, до листа номинальной толщиной 10 мм, далее холодная прокатка до номинальной толщины 6 мм.

Зеренная структура листов из сплава В950ч-Т2 приведена на рис. 4. Все исследованные листы имеют частично рекристаллизованную структуру.

Средний размер зерна в плоскости прокатки для листа толщиной 6 мм в состоянии Т2, изготовленного из слитка, гомогенизированного по опытному режиму 3, составляет 0,09 мм. По сравнению с этими листами у листов толщиной 6 мм из слитков, гомогенизированных по серийному режиму 1, средний размер зерна более чем в 2 раза крупнее (табл. 2, рис. 4).

Согласно данным работ [17, 21], увеличение среднего размера зерна в листах в плоскости прокатки $>0,20$ мм отрицательно влияет на прочностные свойства, характеристики сопротивления усталости и трещиностойкости. В связи с этим необходимость более детального изучения влияния технологических параметров изготовления листов на размер зерна не утратила актуальности.

Листы толщиной 6 мм, полученные из слитков, гомогенизированных по опытному двухступенчатому режиму, и состаренные по стандартному режиму Т2, отличались более высоким уровнем прочностных характеристик и более низким уровнем относительного удлинения по сравнению с листами, изготовленными по серийной технологии (табл. 2). При этом величины $\sigma_{0,2}$ соответствовали верхнему пределу значений, допустимых техническими условиями для листов из сплава В950ч в состоянии Т2.

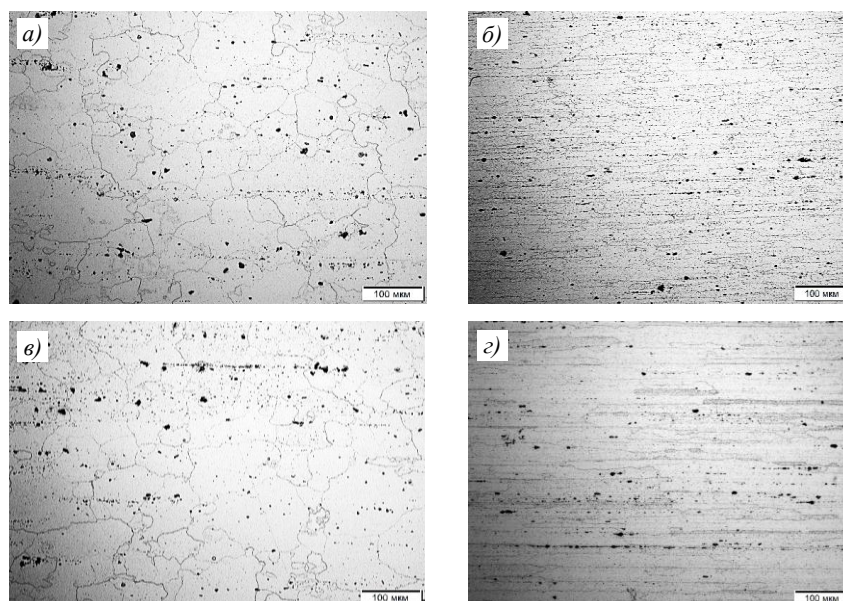


Рис. 4. Микроструктуры листов толщиной 6 мм из сплава В950ч-Т2 в плоскости прокатки (а, в) и по толщине в продольном направлении (б, г). Исходные слитки гомогенизированы по опытному режиму 3 (а, б) и серийному режиму 1 (в, г)

Таблица 2

Влияние режимов гомогенизации слитков и режимов старения на структуру, механические и коррозионные свойства листов толщиной 6 мм из сплава В950ч

Характеристики	Значение характеристики листов		
	по опытному режиму гомогенизации 3		по серийному режиму гомогенизации 1
	после старения по режиму		
	экспериментальному	стандартному Т2	
Предел прочности σ_b , МПа	525–530	540–550	495–510
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	455–460	495–510	420–465
Относительное удлинение δ_5 , %	14,0–14,5	9,5–11,0	11,5–15,0
Циклическая долговечность $N_{ср}$, циклы	>250000	>200000	140000
Вязкость разрушения* K_c^y , МПа $\sqrt{м}$ (при ширине образца $B = 500$ мм)	130	102	125***
Склонность к межкристаллитной коррозии**, мм	0,051	0,071	0,12
Склонность к расслаивающей коррозии, балл (не более)	3	4	3
Условный средний размер зерна, мм	0,09		0,20
* Минимальные значения.			
** Максимальные значения.			
*** Значение K_c^y получено при испытании образцов шириной $B = 750$ мм. Определяемый уровень K_c^y тем выше, чем больше ширина образца.			

Высокий уровень прочностных характеристик может быть причиной снижения показателей трещиностойкости и ухудшения коррозионной стойкости таких листов. В связи с этим для обеспечения сочетания оптимальных уровней прочностных характеристик, вязкости разрушения и коррозионной стойкости листы, изготовленные из слитка,

гомогенизированного по опытному режиму 3, были состарены по новому экспериментальному режиму.

Анализ результатов испытаний листов толщиной 6 мм из сплава В95оч, полученных по серийной и опытной технологиям, показывает (табл. 2), что использование опытного двухступенчатого режима гомогенизации слитков в сочетании с новым экспериментальным режимом старения листов по сравнению с серийной технологией позволяет получить более высокие значения относительного удлинения, вязкости разрушения, циклической долговечности и коррозионной стойкости.

Заключения

Установлено влияние режимов гомогенизационного отжига на структуру и параметры технологической пластичности плоских слитков из сплава В95оч, а также на зеренную структуру и комплекс служебных характеристик листов, полученных из этих слитков.

Наиболее высокие показатели технологической пластичности ($\delta = 90\text{--}100\%$) в температурном интервале деформации $350\text{--}430^\circ\text{C}$ отмечены для слитков из сплава В95оч после гомогенизационного отжига по опытному двухступенчатому режиму 3. Такие значения относительного удлинения обусловлены уменьшением объемной доли неравновесных эвтектических первичных фаз кристаллизационного происхождения по границам дендритных ячеек с 6,7 % до 2,6 % после гомогенизационного отжига слитков. Кроме того, на этот процесс влияет формирование более мелких вторичных частиц дисперсоидов (Т-фазы) протяженностью до 200 нм. При этом в слитке, гомогенизированном по стандартному режиму 1, наблюдаются частицы протяженностью до 500 нм.

Проведенные исследования показали, что опытный двухступенчатый режим гомогенизации слитков из сплава В95оч в сочетании с новым экспериментальным режимом старения листов обеспечивает более высокие значения характеристик усталостной долговечности, трещиностойкости (вязкости разрушения) и коррозионной стойкости при сопоставимом уровне прочностных характеристик. Кроме того, уменьшается средний размер зерна по сравнению с листами, полученными по серийной технологии (гомогенизация слитков по одноступенчатому режиму и упрочняющая термическая обработка листов по режиму Т2).

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
3. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2. С. 5–6.
5. Дуюнова В.А., Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Яковлев А.Л., Леонов А.А. Перспективные разработки в области легких материалов для современной авиакосмической техники // Технология легких сплавов. 2018. № 4. С. 28–43.

6. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В. и др. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al–Zn–Mg–Cu, их роль в технике и возможности развития // *Технология легких сплавов*. 2016. № 2. С. 43–49.
8. Оглодков М.С., Романенко В.А., Бенариев И., Рудченко А.С., Григорьев М.В. Исследование промышленных полуфабрикатов из перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
9. Сенаторова О.Г., Уксусников А.Н., Легошина С.Ф., Иванов А.Л., Сидельников В.В. Влияние различных малых добавок на структуру и свойства листов из высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. Вып.: Перспективные алюминиевые, магниевые и титановые сплавы для авиакосмической техники. С. 91–95.
10. Никитин В.И. Технологии генной инженерии – новое направление в производстве алюминиевых сплавов // *Сб. тр. науч.-техн. конф. «Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов»*. Самара, 2000. С. 158–165.
11. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова*. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2008. Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы, ч. 1: Деформируемые алюминиевые сплавы, кн. 2. С. 35–66.
12. Фридляндер И.Н. *Металловедение алюминиевых сплавов*. М.: Наука, 1985. 238 с.
13. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Цуканов С.Л. Термическая обработка деформируемых алюминиевых сплавов. М.: НП «АПРАЛ», 2020. 552 с.
14. Wei Wang, Ralph T. Shuey. Homogenization Model for 7xxx Aluminum Alloy // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama, 2010. P. 264–269.
15. Нечайкина Т.А., Оглодков М.С., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Яковлев С.И., Шляпников М.А. Особенности закалки широких обшивочных плакированных листов из алюминиевого сплава В95п.ч. на линии непрерывной термической обработки // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33.
16. Асташкин А.И., Зайцев Д.В., Селиванов А.А., Ткаченко Е.А. Влияние гомогенизационного отжига на структурно-фазовое состояние и технологическую пластичность слитков из алюминиевого сплава 1163 // *Труды ВИАМ*. 2024. № 7 (137). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.
17. Фридляндер И.Н., Берстенов В.В., Ткаченко Е.А. и др. Влияние термической обработки и деформации на величину зерна и механические свойства сплавов типа дуралюмин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 7. С. 3–6.
18. Нечайкина Т.А., Блинова Н.Е., Иванов А.Л., Козлова О.Ю., Кожекин А.Е. Исследование влияния режимов гомогенизации и закалки на структуру и механические свойства раскатных колец из сплава В95о.ч.-Т2 // *Труды ВИАМ*. 2018. № 10 (70). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36.
19. Yu-lin Zheng, Cheng-bo Li, Sheng-dan Liu et al. Effect of homogenization time on quench sensitivity of 7085 aluminum alloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. Vol. 24. P. 2275–2281.
20. Арышенский В.Ю., Гречникова А.Ф., Дриц А.М., Соседков С.М. Выбор технологических параметров для снижения размера зерна в основе и плакировке обшивочных листов из алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2010. № 3. С. 21–30.
21. Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г., Милевская Т.В., Иванов А.Л. Влияние размера зерна на комплекс свойств обшивочных плакированных холоднокатаных листов из базовых сплавов 1163 и В95пч // *Цветные металлы*. 2014. № 13. С. 57–63.

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. 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.
3. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
4. Tarasov Yu.M., Antipov V.V. The VIAM new materials – for perspective aviation engineering of production of JSC «OAK». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 5–6.
5. Duyunova V.A., Nechaikina T.A., Oglodkov M.S., Yakovlev A.L., Leonov A.A. Promising developments in the field of lightweight materials for modern aerospace technology. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2018, no. 4, pp. 28–43.
6. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
7. Senatorova O.G., Antipov V.V., Bronz A.V. et al. High-strength and super-strong alloys of the traditional Al–Zn–Mg–Cu system, their role in technology and development possibilities. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 2, pp. 43–49.
8. Oglodkov M.S., Romanenko V.A., Benarieb I., Rudchenko A.S., Grigoryev M.V. Study of industrial semi-finished products from advanced aluminum-lithium alloys for aircraft products. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
9. Senatorova O.G., Uksusnikov A.N., Legoshina S.F., Ivanov A.L., Sidelnikov V.V. Effect of various small additives on the structure and properties of sheets made of high-strength alloys of the Al–Zn–Mg–Cu system. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2002, is.: Promising aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering, pp. 91–95.
10. Nikitin V.I. Genetic engineering technologies – a new direction in the production of aluminum alloys. *Proc. scientific-technical. conf. «New directions of development of production and consumption of aluminum and its alloys»*. Samara, 2000, pp. 158–165.
11. *Aviation materials: handbook in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, 2008, vol. 4: Aluminum and Beryllium Alloys, Part 1: Wrought Aluminum Alloys, book 2, pp. 35–66.
12. Fridlyander I.N. *Metallurgy of Aluminum Alloys*. Moscow: Nauka, 1985, 238 p.
13. Kolobnev N.I., Ber L.B., Tsukanov S.L. *Heat Treatment of Wrought Aluminum Alloys*. Moscow: NP «APRAL», 2020, 552 p.
14. Wei Wang, Ralph T. Shuey. Homogenization Model for 7xxx Aluminum Alloy. *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama, 2010, pp. 264–269.
15. Nechaykina T.A., Oglodkov M.S., Ivanov A.L., Kozlova O.Yu., Yakovlev S.I., Shlyapnikov M.A. Features of hardening of wide cladding sheets from V95p.ch. aluminum alloy on a continuous heat treatment line. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-25-33.
16. Astashkin A.I., Zaitsev D.V., Selivanov A.A., Tkachenko E.A. The influence of homogenization annealing on the structural phase evolution and technological plasticity of aluminum alloy 1163 ingots. *Trudy VIAM*, 2024, no. 7 (137), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-7-12-23.

17. Fridlyander I.N., Berstenev V.V., Tkachenko E.A. et al. Effect of heat treatment and deformation on grain size and mechanical properties of duralumin alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2003, no. 7, pp. 3–6.
18. Nechaikina T.A., Blinova N.E., Ivanov A.L., Kozlova O.Yu., Kozhekin A.E. Research of the effect of homogenization and quench hardening modes on the structure and mechanical properties of retail rings from alloy B95o.ch.-T2. *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 20, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-27-36.
19. Yu-lin Zheng, Cheng-bo Li, Shengdan Liu et al. Effect of homogenization time on quench sensitivity of 7085 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, vol. 24, pp. 2275–2281.
20. Aryshenskiy V.Yu., Grechnikova A.F., Drits A.M., Sosedkov S.M. Selection of technological parameters for reducing the grain size in the base and cladding of cladding sheets made of aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2010, no. 3, pp. 21–30.
21. Tkachenko E.A., Senatorova O.G., Milevskaya T.V., Ivanov A.L. Influence of grain size on the complex of properties of clad cladding cold-rolled sheets made of base alloys 1163 and B95pch. *Tsvetnye metally*, 2014, no. 13, pp. 57–63.

Информация об авторах

Асташкин Александр Игоревич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бабанов Виталий Викторович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Селиванов Андрей Аркадьевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткаченко Евгения Анатольевна, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

Evgenia A. Tkachenko, Senior Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.10.2024.
The article was submitted 14.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.10.2024.

Научная статья

УДК 669.018.292:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЯЧЕЙ И ТЕПЛОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ТИПА VT23

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹

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

Аннотация. Проведено исследование особенностей технологии прокатки листов из высокопрочного титанового сплава типа VT23 в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Для отработки режимов прокатки сплава применяли компьютерное моделирование в специальном программном комплексе. Образцы из сплава типа VT23 подвергали прокатке при различной температуре, в результате получены оптимальные режимы горячей и теплой обработки давлением. Проанализированы механические свойства и структура полученных листов, которые удовлетворяют требуемым значениям.

Ключевые слова: титан, термообработка, деформация, пластичность, авиационная промышленность, прокатка, микроструктура

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Исследование термомеханических параметров горячей и теплой прокатки титанового сплава типа VT23 // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32.

Scientific article

INVESTIGATION OF THERMO-MECHANICAL PARAMETERS OF HOT AND WARM ROLLING OF TITANIUM ALLOY VT23 TYPE

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹

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

Abstract. In present work the study of technology particularities of high-strength titanium alloy rolling sheets VT23 under conditions of the National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM. Computer modeling in a special software package was used to develop the alloy rolling regimes. Samples of the VT23 alloy were rolled at different temperatures, as a result, optimal regimes of hot and warm pressure treatment were obtained. The mechanical properties and structure of the obtained sheets were analyzed, which satisfy the required values.

Keywords: titanium, heat treatment, deformation, plasticity, aviation industry, rolling, microstructure

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Investigation of thermo-mechanical parameters of hot and warm rolling of titanium alloy VT23 type. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-23-32.

Введение

Термически упрочняемые титановые сплавы получили широкое распространение в различных отраслях машиностроения [1]. В отечественной промышленности освоено производство термически упрочняемых титановых сплавов типа BT6, BT14, BT15 и других с большим пределом прочности в отожженном состоянии [2, 3]. Однако в связи с развитием техники и увеличивающимся спросом на продукцию из титановых сплавов возникла потребность в освоении технологий изготовления полуфабрикатов, которые по удельной прочности могут конкурировать с полуфабрикатами из высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов [4].

Одним из таких сплавов является сплав типа BT23 – многокомпонентный сплав системы Ti–Al–Mo–V–Cr–Fe, который относится к двухфазным термически упрочняемым ($\alpha + \beta$)-сплавам мартенситного типа. Температура превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow \beta$ составляет 900–930 °C [5]. По своему фазовому составу сплав типа BT23 близок к сплаву типа BT14. Отличие сплава типа BT23 от сплава типа BT22 состоит в меньшей степени легирования молибденом (1,5–2,5 вместо 4,0–5,5 %) [6], что придает ему некоторые более выгодные технологические и механические свойства. Химический состав сплава типа BT23 следующий [7], % (по массе):

Ti	Fe	Cr	Mo	V	Al
84,0–89,3	0,4–0,8	0,8–1,4	1,5–2,5	4,0–5,0	4,0–6,3

Однако сплав типа BT23, как и другие титановые сплавы, чувствителен к перегреву [8]. Его нагрев выше температуры полиморфного превращения приводит к интенсивному росту зерен [9] и огрублению структуры [10], что снижает характеристики пластичности. Механические свойства сплава представлены в таблице.

Свойства сплава типа BT23 [7]

Состояние	σ_b , МПа	δ_5 , %
Отожженное	~(1100–1200)	10–13
Термоупрочненное	~(1450–1600)	4–6

Сплав хорошо сваривается всеми видами сварки, сварные соединения сплава характеризуются высокой прочностью. В научно-технической литературе рекомендуются следующие режимы термической обработки сплава типа BT23: отжиг при температуре нагрева 750 °C, охлаждение на воздухе; термоупрочняющая обработка – закалка при температуре 780–800 °C, охлаждение в воде и старение при 450–520 °C с охлаждением на воздухе [11].

Цель данной работы – определение термомеханических параметров прокатки листов из сплава типа BT23 толщиной 2 мм и разработка технологии прокатки в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, а также определение уровня механических свойств листов в отожженном и упрочненном состоянии [12].

Материалы и методы

Исследования параметров и режимов горячей прокатки сплава типа BT23 проводили на образцах толщиной 12 мм. Образцы получали из опытных слитков, изготовленных методом двойной электронно-лучевой выплавки [13]. Для анализа возможности

осуществления прокатки титанового сплава в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ использовали специализированный программный комплекс [14], с помощью которого производили компьютерное моделирование для определения усилий прокатки и расчета размеров полученных полуфабрикатов [15].

Образцы под прокатку нагревали в камерной электропечи с максимальной рабочей температурой 1250 °С. Для компенсации потери тепла образцов при переносе их от печи к прокатному стану температуру печи устанавливали на 20 °С выше температуры прокатки. Образцы загружали в печь в садках по 12 шт. и устанавливали на ребро с зазором для обеспечения лучшего прогрева. При прокатке за несколько проходов образцов из садки одного нагрева происходят большие тепловые потери, поэтому для их компенсации прокатываемые образцы после каждого прохода подогревали в печи в течение 10–15 мин до температуры на 20–30 °С ниже температуры предыдущей прокатки.

Исследование параметров горячей прокатки проводили на стане для горячей прокатки. Диаметр валков составлял 450 мм, длина 900 мм при скорости прокатки 0,4 м/с. Определение силовых параметров прокатки производили при температурах выше и ниже температуры фазового превращения. Образцы прокатывали с обжатием 15 % за проход при всех температурах и с обжатием 30 % за проход при температурах горячей прокатки. Кроме того, для оценки деформируемости сплава при температурах горячей прокатки образцы прокатывали с обжатием 45 % за один проход.

Для определения влияния различных температурно-деформационных режимов прокатки на механические свойства сплава типа ВТ23 проводили горячую прокатку образцов толщиной 12 мм до толщины 4,5 мм за 3–4 прохода с обжатием 15–30 % за проход по двум температурным режимам: в диапазоне горячей и теплой прокатки. Горячекатаные образцы толщиной 4,5 мм после травления подвергали тепловой прокатке при температурах ниже температуры полиморфного превращения до толщины 2 мм за 4–7 проходов с обжатием 6–20 % за проход.

Испытания образцов на определение относительного удлинения и кратковременной прочности осуществляли по ГОСТ 9651–84 и ГОСТ 1497–84. Структуру полученного полуфабриката изучали на микроскопе при увеличении $\times 300$. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Компьютерное моделирование процессов прокатки

Компьютерное моделирование процессов прокатки листов из сплава типа ВТ23 проводили с целью отработки режимов прокатки сплава. В специализированном программном комплексе выполнены расчеты с помощью метода конечных элементов. Оценивали как форму и температуру заготовки, так и усилие деформации. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 1. Видно, что при моделировании горячей прокатки (рис. 1, а–в) температура снижается с 1000–900 до 800–700 °С, а усилие возрастает в ~ 10 раз. Это может быть связано с уменьшением толщины заготовки и ее остыванием. После подогрева до температуры теплой прокатки (рис. 1, г–е) усилия снижаются до $\sim (5–6)$ МН и сохраняются на протяжении всех переходов прокатки.

На рис. 2 показан результат моделирования теплой прокатки. Видно, что сечение заготовки соответствует требуемым размерам с незначительными отклонениями.

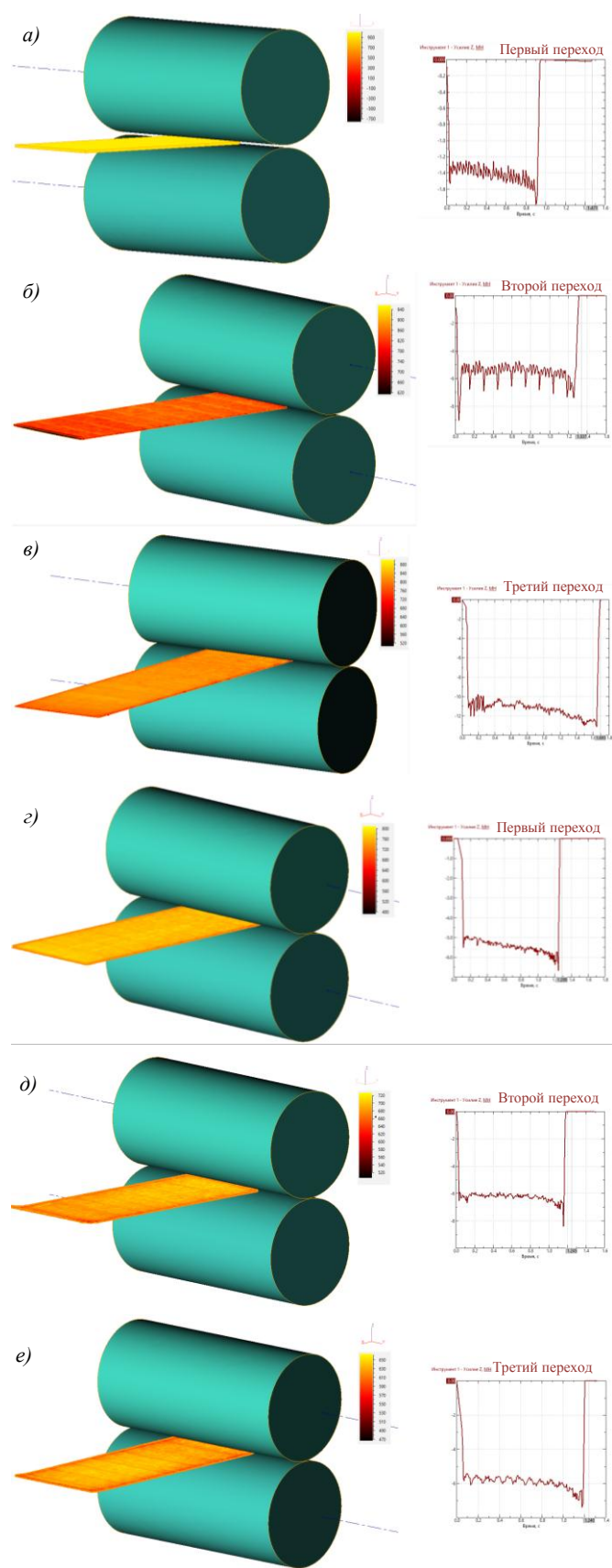


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования для листов из сплава типа BT23: распределение температурных полей и графики силы при горячей (а–в) и теплой прокатках (г–е)

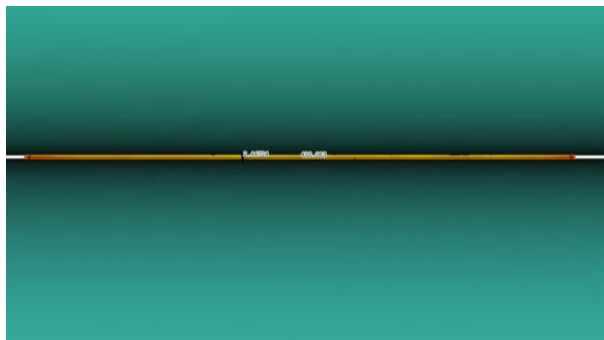


Рис. 2. Сечение полученного листа из сплава типа VT23 после теплой прокатки

Анализ результатов компьютерного моделирования в специальном программном комплексе позволяет сделать вывод о сходимости полученной модели деформации с экспериментальными данными, полученными в процессе прокатки листов.

Зависимость силовых параметров прокатки от температуры и степени деформации

Указанные зависимости определяли при прокатке образцов в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения с обжатием 15 и 30 % за проход с замером полного давления металла на валки. В данной работе изучено изменение средних удельных давлений в зависимости от температуры при деформации сплава типа VT23 на 15 и 30 %. Значения удельных давлений с уменьшением температуры возрастают со 100–150 до 950–1000 МПа.

Эти изменения соответствуют фазовому состоянию сплава. Резкое снижение значений удельных давлений начинается с температуры на 300 °С ниже температуры полиморфного превращения, а при температуре на 100 °С ниже превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$ сплав типа VT23 достаточно разупрочняется и удельные давления при обжатии 30 % составляют 200–280 МПа и 150–250 МПа – при обжатии 15 %.

Степень деформации оказывает меньшее влияние на силовые параметры прокатки, чем температура. Так, понижение температуры прокатки на 100 °С в интервале существования $(\alpha + \beta)$ -фазы сопровождается повышением удельного давления на 240–300 МПа, а увеличение деформации с 15 до 30 % вызывает повышение удельного давления не более чем на 50–100 МПа.

Деформируемость сплава типа VT23 в горячем состоянии высокая. При прокатке контрольных образцов в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения с обжатием 45 % за проход появления трещин не наблюдалось. При горячей прокатке образцов толщиной 12 мм в этом диапазоне температур удельные давления изменялись в пределах 235–520 МПа. При теплой прокатке образцов толщиной 4,5 мм с обжатием 15 % в интервале температур ниже температуры полиморфного превращения удельные давления изменялись в пределах 290–460 МПа.

Характер изменения крутящих моментов в зависимости от температуры и степени деформации согласуется с характером изменения удельных и полных давлений. Абсолютные значения крутящих моментов в основном пропорциональны полному давлению металла на валки.

Зависимость силовых параметров прокатки от геометрических факторов

Известно, что геометрические факторы (такие как толщина и ширина полосы, диаметр валков и величина обжатия) оказывают влияние на силовые параметры прокатки. С изменением геометрических факторов изменяются условия напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и, следовательно, силовые параметры прокатки.

Для определения влияния геометрических факторов на удельное давление и крутящий момент образцы толщиной 12 и 4,5 мм прокатывали с обжатием 15 % при температурах, применяемых при исследовании.

Ширина образцов выбиралась из условия, что при отношении ширины к высоте ≥ 5 она не оказывает существенного влияния на удельное давление. В данной работе изучено изменение удельных давлений в зависимости от температуры и толщины полосы при прокатке с обжатием 15 %. При исследовании выяснилось, что с уменьшением толщины прокатываемой полосы (при прочих равных условиях) удельные давления интенсивно растут, особенно в области низких температур.

Так, при прокатке образцов толщиной 12 и 4,5 мм с обжатием 15 % при температуре на 100 °С ниже температуры полиморфного превращения средние удельные давления составили 245 и 440 МПа соответственно, т. е. при уменьшении толщины полосы в 2,5–2,7 раза удельные давления увеличились в 2 раза. С уменьшением температуры значение средних удельных давлений возрастает со 100–200 до 1000–1200 МПа.

Интенсивный рост удельного давления с уменьшением толщины полосы можно объяснить влиянием следующих факторов:

- увеличением отношения площади контактных поверхностей к объему металла, находящегося в очаге деформации, и, как следствие, более сильным проявлением сил контактного трения;
- усугублением объемного напряженного состояния вследствие большого затруднения поперечной деформации;
- более интенсивным подхлаживанием полосы валками при горячей деформации.

Однако силовые параметры прокатки зависят не только от толщины полосы, но и от диаметра валков. С увеличением диаметра валков возрастает протяженность очага деформации и усугубляются условия напряженно-деформированного состояния, в большей степени проявляются силы контактного трения. Совместное влияние на силовые параметры прокатки толщины полосы h и диаметра валков d принято выражать отношением h/d , которое является наиболее характерным показателем зависимости силовых параметров прокатки от геометрических факторов.

Для построения этих зависимостей прокатке подвергали образцы толщиной от 12 до 2 мм. При этом отношение h/d изменялось в пределах от 0,012 до 0,002.

Изучение изменения средних удельных давлений в зависимости от отношения h/d при обжатии 30 и 15 % показало, что с уменьшением отношения h/d в 4 раза средние удельные давления возрастают в $\sim(1,5-2)$ раза как при горячей, так и при теплой прокатке.

Зависимость коэффициента трения от температуры

Известно, что реальные значения коэффициента трения получают только при плоской прокатке, когда отсутствует неравномерность высотной деформации, что обеспечивается при отношении длины и высоты не менее 2,5. Поэтому в данной работе коэффициент трения определяли только при прокатке образцов толщиной 4,5 мм с относительным обжатием 15 % в диапазоне температур от температуры полиморфного превращения до температуры на 400 °С ниже этой температуры.

В области существования $(\alpha + \beta)$ -фаз с повышением температуры коэффициент трения несколько возрастает – с 0,15–0,2 при температуре на 400 °С ниже температуры полиморфного превращения до 0,3 при температуре на 200 °С ниже этой температуры, а затем при дальнейшем нагреве наблюдается его снижение.

Некоторый рост коэффициента трения, который наблюдался при температуре на 200 °С ниже температуры полиморфного превращения, можно объяснить образованием окалины, которая ухудшает скольжение. Существенное снижение значений коэффициента трения при температуре, близкой к температуре полиморфного превращения, объясняется резким разупрочнением сплава и снижением значений удельных давлений.

При прокатке полос толщиной 4,5 мм в диапазоне температур от температуры полиморфного превращения до температуры на 400 °С ниже коэффициент трения изменяется в пределах 0,1–0,32.

Исследование влияния различных температурно-деформационных режимов прокатки на структуру и свойства сплава типа VT23

Для получения тонких листов из сплава типа VT23 производили предварительную горячую прокатку с окончанием деформации в β -области и последующей теплой прокаткой. После обработки тонких листов давлением проводили их упрочняющий отжиг.

Влияние температурно-деформационных режимов горячей прокатки на структуру и свойства горячекатаных листов определяли после прокатки в диапазоне температур выше и ниже температуры полиморфного превращения на образцах с толщины 12 мм до толщины 4,5 мм и с относительным обжатием 15 и 30 %.

Структуру и свойства теплокатаных листов исследовали на образцах толщиной 2 мм, прокатанных с толщины 4,5 мм по четырем режимам ниже температуры полиморфного превращения.

В данной работе исследовали зависимости механических свойств от температуры прокатки образцов, прокатанных с толщины 12 мм за один проход со степенями деформации 15 и 30 %. При прокатке при температуре на 200 °С ниже температуры полиморфного превращения механические свойства образцов характеризуются более высокими значениями пластичности, относительного удлинения и сужения и меньшей прочностью, по сравнению с прокаткой при более высоких и низких температурах. Прокатка при температуре на 400 °С ниже температуры превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow$ β привела к резкому снижению прочности и пластичности. С повышением температуры на 100 °С выше температуры полиморфного превращения наблюдается незначительный рост прочности при одновременном снижении пластичности.

Исследование микроструктуры показало, что после предварительной горячей прокатки при температуре полиморфного превращения и при температуре на 100 °С выше этой температуры образцы имеют пластинчатую ($\alpha + \beta$)-структуру (рис. 3, а). После теплой прокатки при температуре на 100–200 °С ниже температуры превращения ($\alpha + \beta$) $\leftrightarrow$ β на изученной структуре продемонстрированы β -зерна с зернограничной α -фазой и внутризеренной пластинчатой α -фазой (рис. 3, б).

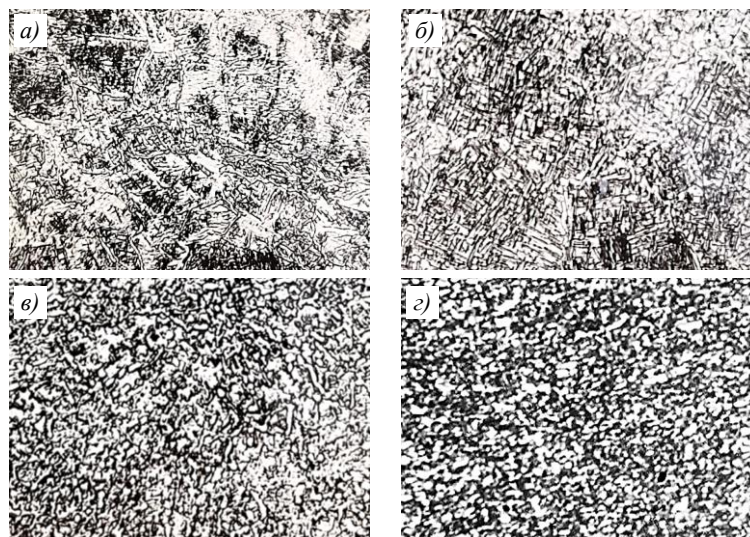


Рис. 3. Микроструктуры листов сплава типа VT23: а – после горячей прокатки с окончанием деформации в β -области; б – после теплой прокатки; в – после упрочняющей термической обработки; з – после прокатки за два перехода и с поворотом на 90 градусов с последующей термической обработкой

В результате механических испытаний образцов толщиной 2 мм получено, что в исходном теплокатаном состоянии листовые образцы имели прочность $\sigma_b = 1010\text{--}1205$ МПа при относительном удлинении 11,3–5,1 %. Отжиг приводит к повышению показателей пластичности образцов, прокатанных при температуре, близкой к температурам полиморфного превращения. Анализ механических свойств листовых образцов показал, что температура горячей прокатки должна быть не выше температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$, а температура теплой прокатки – на 200–300 °С меньше.

Для получения оптимальных свойств проводили упрочняющую термообработку листов. Образцы, подвергавшиеся теплой прокатке с обжатию 50 %, на первом этапе проходили закалку при температуре на ~200 °С ниже температуры полиморфного превращения с последующим старением при температуре на ~500 °С ниже температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$. Полученную структуру можно наблюдать на рис. 3, в – на изображении видно, что происходит глобуляризация α -фазы, однако наблюдается и остаточная зернограницная α -фаза.

Из полученного после прокатки и упрочняющей термообработки листа вырезали два образца: в продольном и поперечном направлениях. Испытания образцов на прочность показали, что в продольном направлении $\sigma_b = 1395$ МПа, а в поперечном – $\sigma_b = 1210$ МПа. Эту разницу можно объяснить присутствием остаточной зернограницной α -фазы.

Для того чтобы получить мелкозернистую равноосную структуру, необходимо произвести теплую прокатку с обжатию 30 % с последующим подогревом и повторной прокаткой с обжатию 30 % с изменением направления прокатки на 90 градусов и подвергнуть полученные листы термообработке по режиму закалки и старения. На рис. 3, г показана полученная глобулярная структура – мелкозернистая и однородная. Значение σ_b во всех направлениях составило ~1420 МПа, а относительное удлинение равно 6 %.

Заключения

На оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в широком диапазоне температур и степеней деформации изучены термомеханические параметры прокатки листов толщиной 2 мм из высокопрочного титанового сплава типа ВТ23.

Установлено, что характер изменения удельных давлений в зависимости от температуры прокатки связан с фазовым состоянием сплава. Степень деформации при горячей прокатке оказывает незначительное влияние на удельное давление. При горячей прокатке образцов толщиной 12 мм при температурах, близких к температуре полиморфного превращения, с обжатию 30 % удельные давления составляли ~(150–500) МПа. При теплой прокатке образцов толщиной 4,5 мм при температурах ниже температуры полиморфного превращения с обжатию 15 % удельные давления составляли ~(440–1200) МПа.

Изучена зависимость силовых параметров прокатки от геометрических факторов. Установлено, что с уменьшением толщины полосы в 2,5–2,7 раза удельные давления возрастают в 1,5–2 раза, с уменьшением отношения ширины полосы к диаметру валков в 4 раза удельные давления возрастают в 1,6–2 раза.

Определена деформируемость сплава типа ВТ23 при прокатке при температурах от ~100 °С выше температуры полиморфного превращения до 400 °С ниже этой температуры. Установлено, что сплав обладает достаточно высокой деформируемостью во всем диапазоне исследуемых температур.

Изучена температурная зависимость коэффициента трения при прокатке сплава типа ВТ23. Установлено, что в области существования $(\alpha + \beta)$ -фаз коэффициент трения возрастает с 0,15 до 0,2 при температуре на 400 °С ниже температуры полиморфного превращения и до 0,3–0,32 при температуре на 200 °С ниже этой температуры. При более высоких температурах коэффициент трения снижается вследствие резкого разупрочнения металла.

Изучено влияние различных температурно-деформационных режимов горячей и теплой прокатки на структуру и свойства сплава типа ВТ23. Установлено, что оптимальные механические свойства горячекатаных листов достигаются при прокатке в интервале от температуры полиморфного превращения до температуры на 200 °С ниже этой температуры с относительным обжатием 15–30 %. Оптимальные механические свойства теплокатаных листов достигаются при прокатке на 200–300 °С ниже температуры превращения $(\alpha + \beta) \leftrightarrow \beta$. При прокатке листа за два перехода с поворотом на 90 градусов получаются более мелкозернистая глобулярная структура и однородные свойства во всех направлениях – $\sigma_b = 1420$ МПа и $\delta = 6$ %.

Список источников

1. Моисеев В.Н. Бета-титановые сплавы и перспективы их развития // Металловедение и термическая обработка металлов. 1998. № 12. С. 11–14.
2. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Шарапкин Д.С. Комплекс механических и эксплуатационных свойств катаных заготовок из псевдо- β -титанового сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. 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: 10.18577/2071-91.
5. Хорев А.И. Комплексно-легированный титановый сплав ВТ23 универсального применения // Технология машиностроения. 2007. № 7. С. 23–40.
6. Каблов Е.Н., Путырский С.В., Яковлев А.Л., Крохина В.А., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталостному разрушению штамповок из высокопрочного титанового сплава ВТ22М, изготовленных с заключительной деформацией в $(\alpha+\beta)$ - и β -областях // Титан. 2021. Т. 70. № 1. С. 26–33.
7. Авиационные материалы: справочник в 13 т. М.: ВИАМ, 2010. Т. 6: Титановые сплавы. 95 с.
8. Брун М.Я., Белов С.П., Глазунов С.Г. и др. Металловедение титановых сплавов. М.: Металлургия, 1994. 351 с.
9. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. Скугорев А.В., Капитаненко Д.В., Шишков С.Ю., Мельникова Д.А. Формирование структуры и механических свойств высоколегированных титановых сплавов при изотермической штамповке на воздухе // Титан. 2021. Т. 3 (72). С. 34–40.
11. Швецов О.В., Кондратьев С.Ю. Влияние режимов закалки и старения на эксплуатационные свойства сплава ВТ23 // Научно-технические ведомости СПбГУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 119–133.
12. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В. Современные технологии обработки металлов давлением // Труды ВИАМ. 2015. № 2. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
13. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
14. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисунец Н.Л., Сеницын М.В., Ерохов М.А. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // Цветные металлы. 2007. № 5. С. 98–101.
15. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // Кузнечно-штамповое производство. Обработка металлов давлением. 2004. № 9. С. 38–43.

References

1. Moiseev V.N. Beta-titanium alloys and prospects for their development. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1998, no. 12, pp. 11–14.
2. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
3. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A., Sharapkin D.S. Complex of mechanical and operational properties of rolled blanks from metastable- β -titanium alloy VT47. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-50-59.
4. 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: 10.18577/2071-91.
5. Khorev A.I. Complex-alloyed titanium alloy VT23 for universal use. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, 2007, no. 7, pp. 23–40.
6. Kablov E.N., Putyrskiy S.V., Yakovlev A.L., Krokhina V.A., Naprienko S.A. Study of fatigue fracture resistance of stampings made of high-strength titanium alloy VT22M, manufactured with final deformation in the ($\alpha+\beta$)- and β -regions. *Titan*, 2021, vol. 70, no. 1, pp. 26–33.
7. *Aviation materials: handbook in 13 vols.* Moscow: VIAM, 2010, vol. 6: Titanium alloys, 95 p.
8. Brun M.Ya., Belov S.P., Glazunov S.G. et al. *Metallurgy of titanium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 351 p.
9. Krokhina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. Skugorev A.V., Kapitanenko D.V., Shishkov S.Yu., Melnikova D.A. Formation of the structure and mechanical properties of high-alloy titanium alloys during isothermal stamping in air. *Titan*, 2021, vol. 3 (72), pp. 34–40.
11. Shvetsov O.V., Kondratiev S.Yu. Influence of hardening and aging modes on the operational properties of VT23 alloy. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 119–133.
12. Razuvaev E.I., Moiseev N.V., Kapitanenko D.V., Bubnov M.V. Modern technologies of plastic working of metals. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-3-3.
13. Duyunova V.A., Oglovkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
14. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L., Sinitsyn M.V., Erokhov M.A. Using specialized programs in developing technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
15. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2004, no. 9, pp. 38–43.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.12.2024.
The article was submitted 14.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 02.12.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46

ЛИПКОСТЬ ПРЕПРЕГОВ КАК ФУНКЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВЫКЛАДКЕ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ И ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Хрульков¹, К.И. Донецкий¹, Д.А. Мельников¹, О.Н. Клименко¹, А.В. Славин¹

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

Аннотация. Полимерные композиционные материалы постепенно заменяют металлы, в том числе в таких ответственных конструкциях, как крыло самолета или фюзеляж. Одним из технологических переделов при изготовлении заготовок будущих деталей является процесс выкладки препрега на оснастку. При выполнении выкладки особое значение имеет липкость препрега. Липкость препрега к подложке должна быть такой, чтобы он не отделялся от нее при транспортировке и легко отделялся при перемещении на оснастку. Проанализирована зависимость липкости от температуры, силы уплотнения и скорости отделения от подложки.

Ключевые слова: препрег, липкость, когезия, адгезия, температура, оснастка

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.

Scientific article

PREPREG TACK AS A FUNCTION OF VARIOUS PARAMETERS DURING LAYING OUT BLANKS OF PARTS AND SAMPLES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

A.V. Khrul'kov¹, K.I. Donetsk'y¹, D.A. Melnikov¹, O.N. Klimenko¹, 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. Polymer composite materials are gradually replacing metals, including in such important structures as an aircraft wing or a fuselage. One of the technological stages in the manufacture of blanks for future parts is the process of laying out the prepreg on the tooling. When laying out, the stickiness of the prepreg plays an important role. The stickiness of the prepreg to the substrate should be such that it does not separate from it during transportation and is easily separated when moving onto the tooling. An analysis of the stickiness level depending on temperature, compaction force, and the speed of separation from the substrate is given in this article.

Keywords: prepreg, tack, cohesion, adhesion, temperature, tooling

For citation: Khrul'kov A.V., Donetsk'y 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.

Введение

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) при изготовлении элементов конструкций самолетов, автомобилей, строительных конструкций и в других отраслях промышленности продолжает неуклонно расти [1–5]. При этом проводятся исследования, направленные на определение наиболее важных технологических решений, включая особенности процессов изготовления препрегов, моделирование процессов выкладки и отверждения, а также на изучение свойств и дефектов ПКМ, разработку методов их обнаружения и др. [6–14].

Одной из важных технологических характеристик препрега является липкость, т. е. способность препрега фиксироваться на поверхности оснастки или прилипать к предыдущим слоям препрега при легком надавливании или под действием уплотняющего катка.

На рис. 1 схематично изображена зависимость липкости от температуры с учетом сил когезии и адгезии.

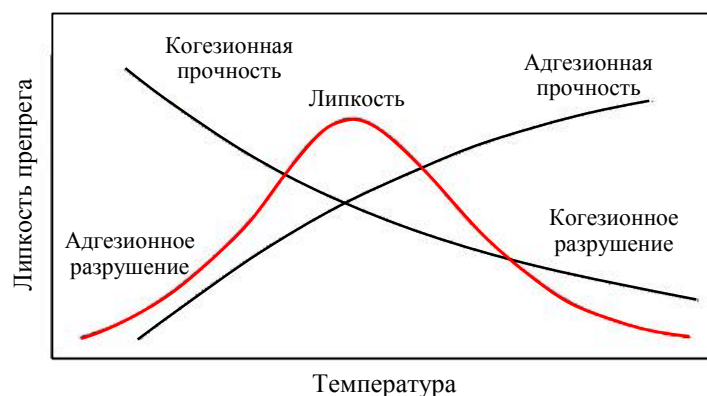


Рис. 1. Зависимость липкости от температуры с учетом сил когезии и адгезии [15]

При контроле липкости препрега особое значение имеют условия проведения испытания, температура материала, оснастки и внешней среды. Температуру можно регулировать с помощью различных источников тепла, например инфракрасных обогревателей или более энергоэффективных светодиодных матриц и импульсных ксеноновых световых обогревателей. При определении оптимальной температуры выкладки слоев препрега возникает конфликт, вызванный необходимостью образования достаточного контакта между слоями препрега (для чего требуются более высокие температуры) и достаточной когезионной прочности связующего (необходимы более низкая температура и, соответственно, более высокая вязкость). Так, высокотемпературный режим укладки препрега приведет к отличной консолидации, но соединение слоев будет непрочным и легко разрушится. Таким образом, максимальная липкость достигается при температуре, обеспечивающей оптимальный компромисс между этими двумя факторами.

В процессе выкладки могут возникнуть дефекты, вызванные недостаточной (рис. 2, а) или излишней липкостью (рис. 2, б), а также избыточной жесткостью наполнителя.

Процесс образования дефектов при выкладке слоев препрега проиллюстрирован на рис. 2. Так, если силы липкости меньше прикладываемых растягивающих сил F , то формируется «мостик» (провисание), как показано на рис. 2, а. Такие перемены обычно образуются в зоне вогнутой формы оснастки. В случае, представленном на рис. 2, б, направление приложенной силы приводит к образованию морщин. Высокая

жесткость слоистого наполнителя вызывает отрыв материала от оснастки на выпуклых поверхностях (рис. 2, в).

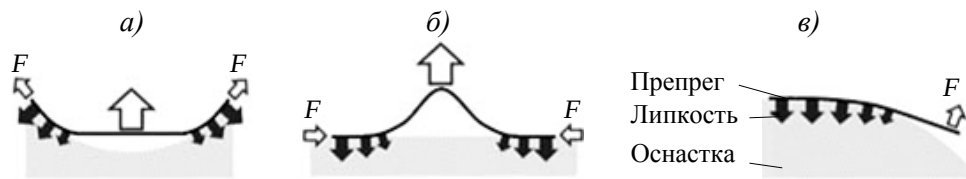


Рис. 2. Формирование дефектов при выкладке: а – «мостик»; б – складка/морщина; в – упругий отскок [16]. F – прикладываемые растягивающие силы

Таким образом, липкость является важнейшей технологической характеристикой препрега, от которой зависит качество изготавливаемого изделия.

Основные методы определения липкости

Для измерения липкости используются различные методы испытаний, наиболее распространенные представлены на рис. 3

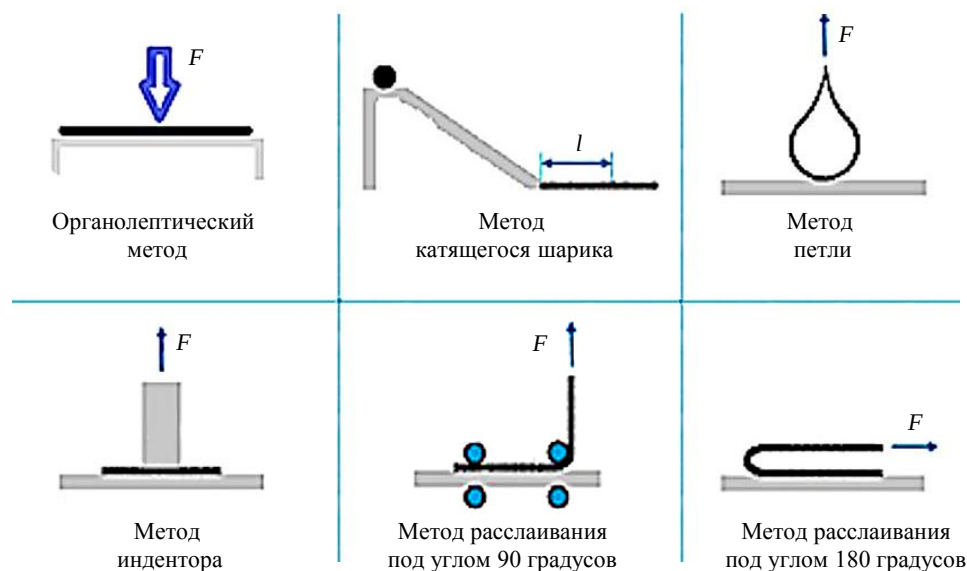


Рис. 3. Методы определения липкости препрега. F – прикладываемые растягивающие силы

Органолептический анализ липкости позволяет определить механический структурный признак, относящийся к силе F , необходимой для устранения контакта с препрегом. Данная методика не требует никакого оборудования, но липкость препрега, определяемая таким образом, является чисто субъективной и может быть охарактеризована как хорошая, плохая, низкая или высокая без численной оценки уровня.

Метод катящегося ролика (на длину l) или шарика несложен, но отличается невысокой воспроизводимостью и большим разбросом результатов испытаний, что не позволяет широко его использовать.

Методы петли и индентора (зондирования) хорошо характеризуют липкость препрегов и могут использоваться для определения усилия отрыва препрега от

подложки в зависимости от продолжительности и усилия прижатия, а также температуры препрега и подложки.

Для определения величины липкости методом расслаивания необходимо использовать два слоя препрега, которые должны быть нагружены так, чтобы связь между ними исчезла из-за нагрузки, превышающей силы липкости (когезии). Это достигается за счет того, что макромолекулярные цепочки смолистой составляющей связующего могут свободно перемещаться в процессе, называемом аутогезией, которая также известна как самосвязывание (процесс, описывающий образование связей между двумя поверхностями идентичных полимеров при повышенных температурах). Соотношение площади контакта и общей площади служит количественным показателем качества консолидации и определяется как степень полного (плотного, истинного) контакта (СПК) [15].

Липкость как функция температуры и скорости укладки/уплотнения, несмотря на достижение высокого значения СПК, снижается с уменьшением скорости взаимного отрыва слипшихся поверхностей, как только достигается режим когезионного разрушения.

На основании этого наблюдения высказано предположение, что максимальная СПК может быть недостаточным критерием для оптимизации процессов автоматизированной выкладки, поскольку липкость препрега зависит как от фазы уплотнения, влияющей на СПК, так и от последующего этапа изменения связи/раскрепления.

Сочетание моделей формирования контакта и адгезии позволяет оценить липкость между двумя слоями термореактивного препрега, которые консолидированы произвольным образом в зависимости от температуры и скорости выкладки, давления уплотнения и фазы консолидации, а также последующей фазы без давления после нанесения материала [16–18].

Липкость, измеряемая стандартным тестом на изотермическое отслаивание

В попытке соотнести установленную СПК с экспериментальным значением в работе [19] использована стандартная процедура испытаний (рис. 4).

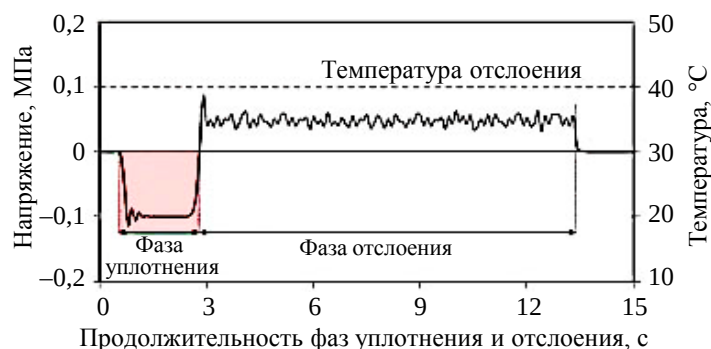


Рис. 4. Изменение осевого напряжения (идеализированное) при стандартном изотермическом испытании [19]

Продолжительность выдержки и давление на этапе уплотнения, а также температура могут быть постоянными или варьироваться.

Цикл измерения включает короткую фазу уплотнения при фиксированной температуре (20–60 °C с шагом 5 °C), за которой следует фаза отслоения при той же температуре. Этот изотермический подход считается стандартным, поскольку является наиболее распространенным способом экспериментального определения липкости препрега с помощью универсальных испытательных машин или реометров в сочетании с климатическими камерами.

Построение графика полученных экспериментальных результатов в виде функции температуры уплотнения/отслоения генерирует точки данных липкости (рис. 5), которые впоследствии аппроксимированы с помощью кривых Гаусса.

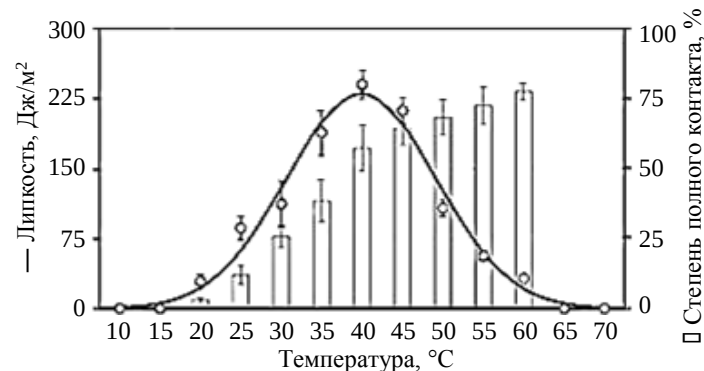


Рис. 5. Зависимость значений липкости, полученных в результате стандартной процедуры испытания, от температуры [19]

Значения СПК дополнительно нанесены на вторичную вертикальную ось (рис. 5) и демонстрируют очень схожие тенденции увеличения липкости вплоть до средних температур $\sim 40^\circ\text{C}$, где зафиксировано максимальное значение. С этого момента липкость резко уменьшается, в то время как СПК продолжает монотонно увеличиваться, приближаясь к граничному значению 100 %. Экспериментально установлено прогрессивное увеличение СПК в зависимости от температуры. Снижение липкости при более высоких температурах вопреки растущей СПК объясняется тем, что при повышении температуры прочность связующего уменьшается, и если сила адгезии превышает силу когезии (при температуре $>40^\circ\text{C}$), то происходит когезионное разрушение.

Влияние давления и продолжительности уплотнения на формирование контакта между слоями препрега

В работе [19] рассмотрено, как при выкладке препрега между его слоями за счет сил уплотнения возникает контакт, площадь которого зависит от давления и продолжительности уплотнения, а также температуры.

Зависимости СПК при уплотнении слоев препрега цилиндром $\varnothing 12$ мм от давления (0,02; 0,1 и 0,2 МПа) и продолжительности уплотнения, а также от температуры (20, 30, 40, 50 и 60°C) представлены на рис. 6.

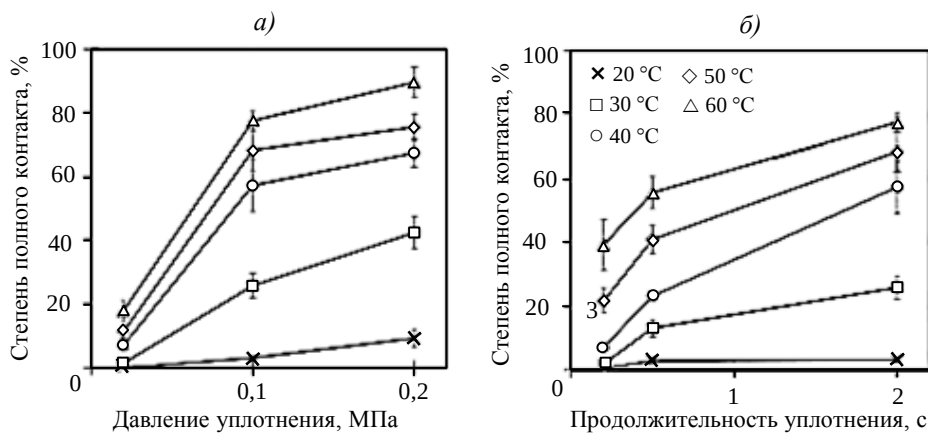


Рис. 6. Зависимости степени полного контакта от давления при продолжительности уплотнения 2 с (а) и от продолжительности уплотнения при давлении уплотнения 0,1 МПа (б) при различных температурах [19]

Из приведенных графиков видно, что СПК возрастает при увеличении давления и продолжительности уплотнения. Кроме того, особое значение для уплотнения препрега при выкладке имеет температура.

Влияние материала подложки на липкость препрега

Для определения липкости препрега к различным материалам выполнены исследования с использованием теста на прилипание зонда (метод зондирования). Измеренные данные аппроксимировали кривыми Гаусса, что позволяет рассчитать такие характеристики кривой, как максимальная липкость и липкость как функция температуры. Распределение Гаусса для температурной зависимости, а также его соответствующие экспериментальные результаты определения липкости между двумя слоями препрега представлены на рис. 7 [19]. Параметр аппроксимации a представляет собой максимальную липкость при температуре b . Параметр c определяет форму наклона кривой и, следовательно, чувствительность липкости (в мкДж/мм²) препрега к отклонению температуры.

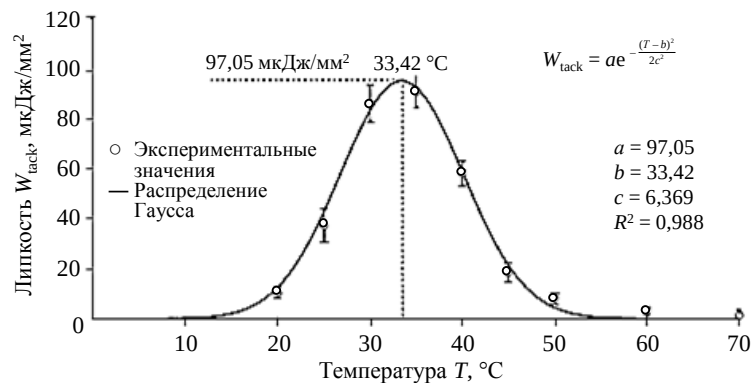


Рис. 7. Зависимость липкости от температуры [19]

На рис. 8 показаны зависимости липкости препрега к подложкам из различных материалов от температуры. Представлены экспериментальные данные и соответствующие кривые Гаусса. Как правило, липкость препрега по отношению к исследуемым твердым подложкам оказывается значительно меньше (в $\sim(2-2,5)$ раза), чем между двумя слоями препрега.

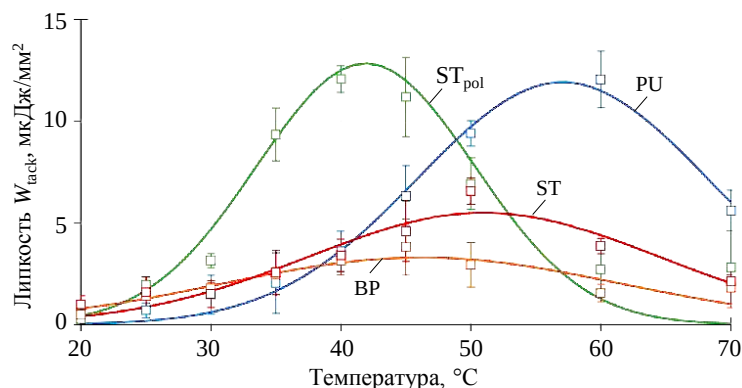


Рис. 8. Температурные зависимости липкости препрега к поверхностям из различных материалов (BP – антиадгезионная бумажная подложка, PU – полиуретан, ST – сталь, ST_{pol} – полированная сталь) [19]

Липкость препрега к полированной стали максимальная, к антиадгезионной бумаге – минимальная. Липкость к полиуретану также имеет высокую величину, а липкость к стальной поверхности занимает среднее положение.

В работах [17–20] проведены испытания по определению величины липкости в процессе изготовления препрегов или изделий из них. Исследовано влияние липкости на качество выкладки, описаны особенности липкости препрега к лентотракту и поверхностям, на которые осуществляется выкладка. В результате таких исследований можно сформулировать требования к адгезионным характеристикам подложек и оснастки.

Значительная разница в липкости препрегов по отношению к различным контактным материалам также приведена в работе [16]. Определены максимальная величина липкости при склеивании листов препрегов ($42,41 \pm 1,66$ Н) и значение липкости для препрега к стали ($5,07 \pm 0,53$ Н).

При сравнении липкости между двумя слоями препрега, а также между препрегом и другими материалами максимальное значение получено для пары «препрег–препрег». Кроме того, в работе [21] показано, что адгезионные характеристики пары «препрег–препрег» в 2,5–5,5 раза больше, чем липкость препрега к другим подложкам, включая температурные сдвиги в системе «препрег–сталь», в зависимости от температуры и поверхности. Экспериментальные значения липкости, впоследствии подтвержденные результатами испытаний при автоматизированной выкладке, показаны на рис. 9 (липкость измерена на ленте препрега шириной 75 мм).

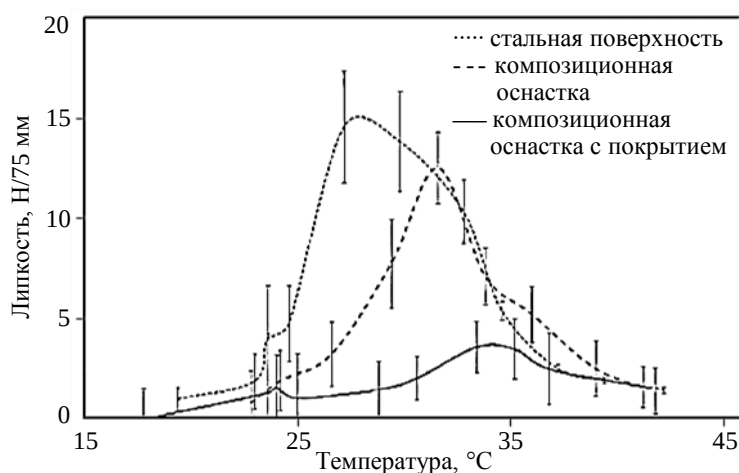


Рис. 9. Липкость препрега к различным видам оснастки [22]

Величины липкости препрега к различным материалам могут служить объяснением проблемы прилипания первого слоя к оснастке. Успешная укладка первого слоя на форму является наиболее сложной задачей при выкладке на оснастку как из нержавеющей стали, так и из композиционных материалов с антиадгезивом или без него. Препрег, проходящий через выкладочную головку при автоматизированной выкладке, контактирует с различными поверхностями, к которым может прилипнуть, такими как уплотняющий валик, направляющие элементы, бумажная подложка, и в конечном итоге взаимодействует с оснасткой или ранее уложенными слоями.

Зависимость величины липкости от метода определения

На рис. 10 показано, что величина липкости, определенная с помощью метода зондирования, значительно меньше значения, полученного методом расслаивания.

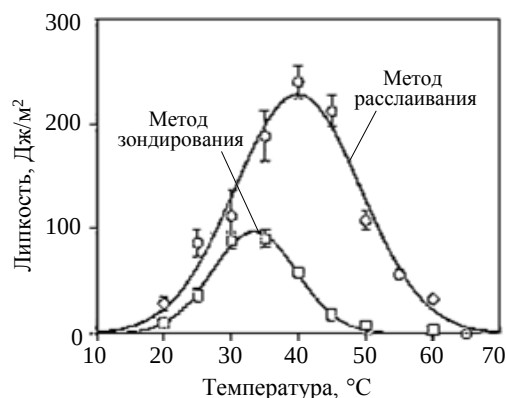


Рис. 10. Зависимость величины липкости от метода измерения [23]

Величина липкости, определенная методом расслаивания больше, так как сила сцепления пары «препрег–препрег» в $\sim 2,5$ раза больше, чем пары «препрег–оснастка». Как отмечено ранее, если оснастка покрыта антиадгезионным слоем, то сила сцепления препрега с такой поверхностью еще меньше. Поэтому при выкладке должны быть правильно подобраны усилие прикатки и температура для обеспечения фиксации первого слоя препрега на оснастке.

Результаты исследований липкости

В работах [20, 21] описаны методы определения липкости с помощью установки, специально спроектированной для исследования липкости препрегов на основе стеклоткани и углеродной ленты. Принцип действия такой установки состоит в том, что измеряется сила отрыва круглых образцов препрега от подложки (полиэтиленовой пленки или бумаги). Структурная схема установки представлена на рис. 11.

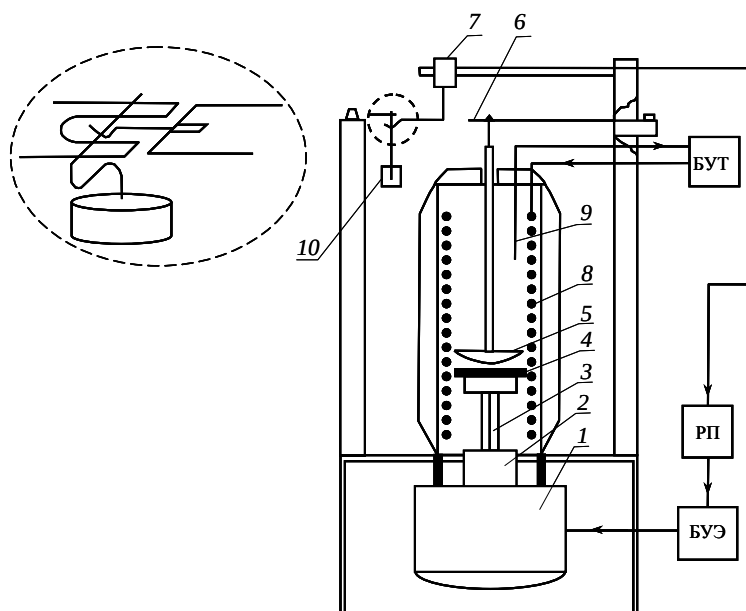


Рис. 11. Структурная схема установки ИЛП: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – стержень; 4 – столик с образцом; 5 – контактная поверхность; 6 – упругая стальная пластина; 7 – индукционный измеритель линейных перемещений; 8 – нагревательный элемент; 9 – терморезистор; 10 – дополнительные грузы; БУЭ – блок управления электродвигателем; РП – регистрирующий прибор; БУТ – блок управления термостатом

В работе [20] приведены результаты измерения липкости препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н и различных наполнителей в зависимости от температуры (рис. 12 и 13). Анализируя приведенные зависимости, следует отметить, что с увеличением температуры липкость препрегов на основе связующего ЭДТ-69Н уменьшается. Авторы данной работы объясняют это многокомпонентностью структуры связующего ЭДТ-69Н. При этом характер изменения липкости при использовании различных наполнителей идентичен. В то же время показано, что из-за различия реологических свойств для каждого вида связующего характерна определенная форма кривой (рис. 14).

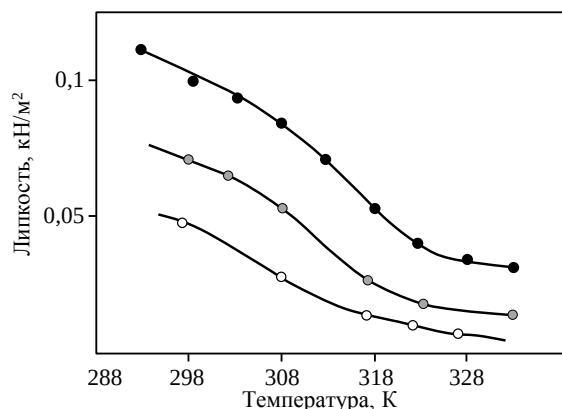


Рис. 12. Температурная зависимость липкости препрега на основе связующего ЭДТ-69Н: ● – углепластик ЛУП 0,1; ● – СВМ; ○ – стеклоткань А2

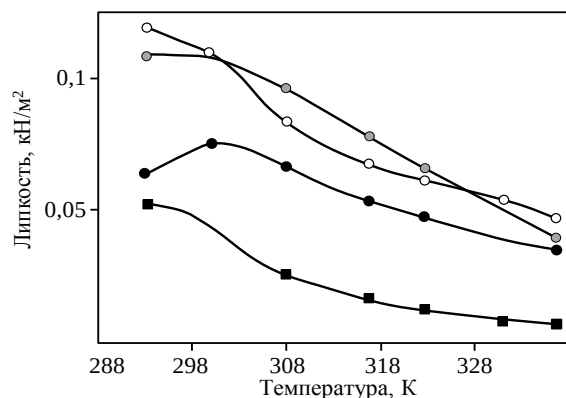


Рис. 13. Температурная зависимость липкости препрега из стеклоткани А2 на основе связующего ЭДТ-69Н: ○ – расплав связующего; ■ – раствор связующего; ● – после облучения ультрафиолетом; ● – после обработки парами ацетона

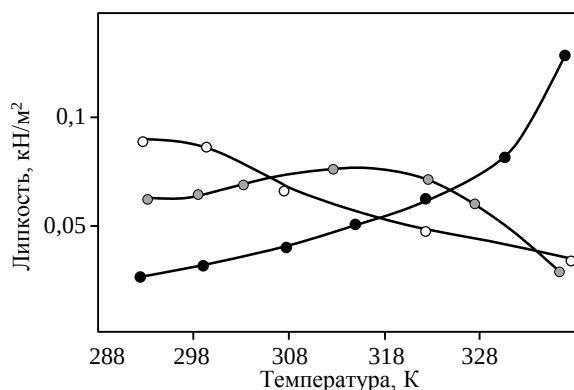


Рис. 14. Температурная зависимость липкости препрега из стеклоткани А2 на различной матричной основе: ● – ФПР-520; ○ – ВСО-200; ● – 5-211Б

В работе [21] исследовано влияние продолжительности хранения на изменение липкости препрега из стеклоткани Т-10-80 и связующего ФПР-520 (рис. 15). На основании полученных результатов выявлено, что в процессе хранения липкость препрега повышается по сравнению с исходным препрегом. Причем в начальный период хранения (через 4 дня) липкость препрега больше, чем через 60 дней. В то же время характер изменения зависимости липкости от температуры испытаний при различных сроках хранения практически одинаков. Все кривые изменения липкости имеют экстремальный характер, максимум липкости с течением времени смещается в

сторону более высоких температур. В других работах [22–26] также рассматривается зависимость липкости препрегов от различных факторов, таких как продолжительность приложения усилия индентора и температура окружающей среды при испытании.

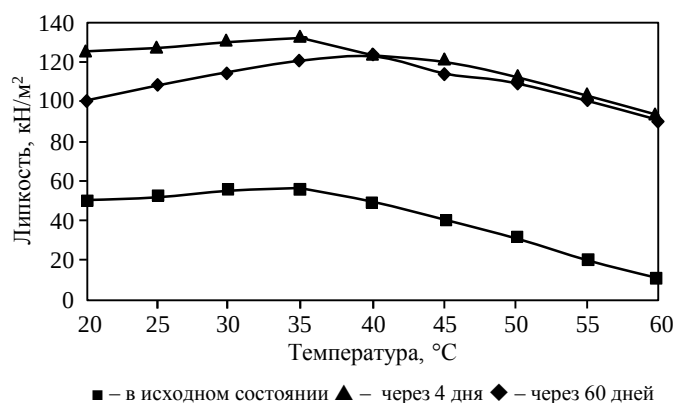


Рис. 15. Изменение липкости препрегов в процессе хранения [21]

В работе [27] описан способ определения липкости препрегов марок КМКУ-2м.120.Э0,1.45, ВКУ-25/SYT49S и ВКУ-39/ВТКУ-2-200 методом зондирования. Показано, что наибольшей липкостью (24,3 кПа) обладает препрег марки КМКУ-2м.120.Э0,1.45, наименьшей (4,1 кПа) – марки ВКУ-25/SYT49S. Кроме того, представлены результаты исследования липкости препрега КМКУ-2м.120.Э0,1.45 к полиэтиленовой пленке и антиадгезионной бумаге. Значения рассматриваемого показателя составили 18,1 и 15,8 кПа соответственно. Сделан вывод о том, что липкость может существенно влиять на технологичность при выкладке. При этом величина липкости зависит от множества факторов, таких как содержание связующего в препреге, температура и влажность воздуха в помещении при выкладке, тип и степень отверждения полимерной матрицы и др.

Заключения

Липкость препрегов – это способность слоев препрега образовывать связь с материалами (свойство прикрепляться с определенной прочностью), с которыми они контактируют в процессе изготовления заготовки детали. Липкость является функцией адгезии и когезии препрега к оснастке, разделительным пленкам, антиадгезионной бумаге или слоям препрега.

Основное значение для формирования величины липкости препрегов при температурах, близких к комнатной (20–23 °C), имеет адгезия, так как величина адгезии значительно меньше, чем когезии. При температурах более 35–40 °C (для препрегов на эпоксидном связующем) когезионная прочность становится меньше адгезионной, величина липкости уменьшается с увеличением температуры, так как разрушение связи происходит по связующему.

Величина липкости зависит от материала, с которым взаимодействует препрег. Наибольшее значение липкости характерно для препрега, наименьшее – для антиадгезионного покрытия. Уровень липкости также зависит от площади образующегося контакта и может существенно меняться при варьировании температуры, давления и продолжительности уплотнения, а также скорости испытания.

Для успешного проведения процессов выкладки или намотки препрегов необходимо обеспечить требуемую прочность сцепления с подложкой и легкое

отделение от нее, отсутствие перехода связующего на разделительные пленки, ролики выкладочных и намоточных машин, складок или «мостиков» при выкладке из-за излишней или недостаточной липкости, а также правильным выбором технологических параметров.

Понимание зависимости влияния технологических параметров и используемых вспомогательных материалов на липкость весьма важны на этапе изготовления как самого препрега, так и изделия из него.

Данная статья является заделом для проведения исследований липкости препрегов в процессах выкладки.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. 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: 05.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
5. 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: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. 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: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
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: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. 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. С. 363.
9. 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: 08.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-49-64.
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. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.

12. 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: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
13. 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: 04.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. 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.
15. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 1: Adhesion and surface wetting // *Composites Part C*. 2023. No. 12. Art. 100396.
16. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication // *Polymer Composites*. 2020. No. 41. P. 3440–3458. DOI: 10.1002/pc.25642.
17. Budelmann D. Tack of epoxy resin films for aerospace-grade prepreps: Influence of resin formulation, B-staging and toughening // *Polymer Testing*. 2022. No. 114. Art. 107709.
18. Герасимов С.Б. Разработка полимерных композиционных материалов для изготовления крупногабаритных сложнопрофильных изделий методом автоматизированной выкладки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2000. С. 24.
19. Budelmann D., Schmidt C., Steuernagel L., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 2: Ply-ply cohesion through contact formation and autohesion // *Composites Part C*. 2023. No. 12. Art. 100396.
20. Постнов В.И., Никитин К.Е., Петухов В.И., Бурхан О.Л., Орзаев В.Г. Метод и устройство для определения липкости препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 3. С. 29–33.
21. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швец Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011. Т. 13. № 4 (2). С. 498–507.
22. Measuring techniques for prepreg tackiness: A COMPARATIVE STUDY SAMPE Europe Conference 2023 Madrid – Spain. URL: https://www.researchgate.net/publication/374949895_Measuring_techniques_for_prepreg_tackiness_A_comparative_study (дата обращения: 17.09.2024).
23. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness // *Composite Part A: Applied Science Manufacture*. 2012. No. 43. P. 423–434.
24. Heinecke F., Willberg C. Manufacturing-induced imperfections in composite parts manufactured via automated fiber placement // *Experimental Mechanics*. 2010. No. 50. P. 599–606.
25. Experimental analysis of prepreg tack. URL: <https://inria.hal.science/hal-01131583/> (дата обращения: 12.09.2024).
26. Tackiness characterization of thermoset prepreg materials. URL: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/987702/1/Dodongeh_MASc_S2021.pdf (дата обращения: 17.09.2024).
27. Мишкин С.И., Клименко О.Н., Куцевич К.Е. Определение липкости препрегов на основе углеродных наполнителей методом зондирования // *Труды ВИАМ*. 2022. № 3 (109). Ст. 04. URL: <http://www.viam-woks.ru> (дата обращения: 05.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-35-43.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. 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: September 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
5. 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, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. 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: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
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: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, p. 363.
9. 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: November 08, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-49-64.
10. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N. et al. Promising polymeric materials for structural composite products with energy-efficient molding mode. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 3–4, pp. 52–54.
11. Veshkin E.A. *Technologies for non-autoclave molding of low-porosity polymer composite materials and large-sized structures made of them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 146 p.
12. 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: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
13. 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: December 04, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
14. 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.
15. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 1: Adhesion and surface wetting. *Composites Part C*, 2023, no. 12, art. 100396.
16. Budelmann D., Schmidt C., Meiners D. Prepreg tack: A review of mechanisms, measurement, and manufacturing implication. *Polymer Composites*, 2020, no. 41, pp. 3440–3458. DOI: 10.1002/pc.25642.
17. Budelmann D. Tack of epoxy resin films for aerospace-grade prepreps: Influence of resin formulation, B-staging and toughening. *Polymer Testing*, 2022, no. 114, art. 107709.
18. Gerasimov S.B. *Development of polymer composite materials for the manufacture of large-sized complex-profile products using the automated laying method*: thesis, Cand. Sc. (Techn.). Moscow, 2000, p. 24.
19. Budelmann D., Schmidt C., Steuernagel L., Meiners D. Adhesion-cohesion balance of prepreg tack in thermoset automated fiber placement. Part 2: Ply-ply cohesion through contact formation and autohesion. *Composites Part C*, 2023, no. 12, art. 100396.

20. Postnov V.I., Nikitin K.E., Petukhov V.I., Burkhan O.L., Orzaev V.G. Method and device for determining the tack of prepregs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2009, no. 3, pp. 29–33.
21. 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.
22. Measuring techniques for prepreg tackiness: A COMPARATIVE STUDY SAMPE Europe Conference 2023 Madrid – Spain. Available at: https://www.researchgate.net/publication/374949895_Measuring_techniques_for_prepreg_tackiness_A_comparative_study (available at: September 17, 2024).
23. Crossley R.J., Schubel P.J., Warrior N.A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness. *Composite Part A: Applied Science Manufacture*, 2012, no. 43, pp. 423–434.
24. Heinecke F., Willberg C. Manufacturing-induced imperfections in composite parts manufactured via automated fiber placement. *Experimental Mechanics*, 2010, no. 50, pp. 599–606.
25. *Experimental analysis of prepreg tack*. Available at: <https://inria.hal.science/hal-01131583/> (available at: September 17, 2024).
26. *Tackiness characterization of thermoset prepreg materials*. Available at: https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/987702/1/Dodongeh_MASc_S2021.pdf (available at: September 17, 2024).
27. Mishkin S.I., Klimenko O.N., Kutcevich K.E. Determination of stickiness of prepregs on the basis of carbon fillers the sounding method. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-35-43.

Информация об авторах

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

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

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

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, 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

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

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

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

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, 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 01.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.10.2024.
The article was submitted 01.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.10.2024.

Научная статья

УДК 678.83

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59

АНТИФРИКЦИОННЫЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОРГАНОПЛАСТИКИ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ САМОЛЕТОВ РАЗРАБОТКИ ОКБ СУХОГО

Г.С. Кулагина¹, Ф.А. Насонов², Г.Ф. Железина¹, А.С. Демина²,
Н.А. Соловьева¹, Б.Б. Морозов², П.М. Шульдешова¹, А.А. Филатов²

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

²Публичное акционерное общество «Объединенная авиастроительная корпорация» Опытное конструкторское бюро Сухого, г. Москва, Russia; info@su.uacrussia.ru

Аннотация. Проведены испытания элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого, изготовленных из препрегов антифрикционных и конструкционных органо-пластиков. Показана эффективность применения антифрикционных и конструкционных органо-пластиков для увеличения износостойкости и ресурса подвижных элементов механизации самолета, а также контактирующих с ними неподвижных деталей. Подтверждена возможность изготовления элементов механизации самолета путем совместного формования препрегов антифрикционного и конструкционного органо-пластиков.

Ключевые слова: органопластик, трение, износостойкость, препрег, механизация самолетов

Для цитирования: Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф., Демина А.С., Соловьева Н.А., Морозов Б.Б., Шульдешова П.М., Филатов А.А. Антифрикционные и конструкционные органо-пластики для элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59.

Scientific article

ANTIFRICTION AND CONSTRUCTIONAL ORGANOPLASTICS FOR ELEMENTS OF DESIGNS OF AIRPLANES OF DEVELOPMENT SUKHOI DESIGN BUREAU

G.S. Kulagina¹, F.A. Nasonov², G.F. Zhelezina¹, A.S. Demina²,
N.A. Solovyeva¹, B.B. Morozov², P.M. Shuldeshova¹, A.A. Filatov²

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

²Public Joint Stock Company «United Aircraft Corporation» Experimental Design Bureau Sukhoi, Moscow, Russia; info@su.uacrussia.ru

Abstract. Tests of details of airplanes of Sukhoi Design Bureau are executed. Details are made of prepregs of antifriction material and constructive organoplastics. Efficiency of antifriction material and constructional organoplastics for raising resistance to antifriction loss and for increasing resource of moving elements of an airplane mechanization, as well as fixed parts, which are in contact, are shown. The possibility of production of mechanization elements of an airplane by means of the co-forming prepregs of antifriction and constructive organoplastics has been proved.

Keywords: organoplastic, friction, wear resistance, prepreg, mechanization of airplanes

For citation: Kulagina G.S., Nasonov F.A., Zhelezina G.F., Demina A.S., Solovyeva N.A., Morozov B.B., Shuldesheva P.M., Filatov A.A. Antifriction and constructional organoplastics for elements of designs of airplanes of development Sukhoi design bureau. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59.

Введение

Авиация и авиастроение – одни из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию, в частности высокоэффективные материалы и технологии [1–3]. Для повышения весовой эффективности авиационной техники требуются принципиально новые материалы, способные выполнять функции как конструкционных, так и функциональных материалов. Этими качествами в значительной мере обладают полимерные композиционные материалы [4–9]. Например, стеклопластики сочетают прочность и радиопрозрачность [10], углепластики – жесткость и термостабильность линейных размеров [11]. Органопластики наряду с высокими механическими характеристиками могут использоваться для защиты от высокоскоростного ударного воздействия [12].

В настоящее время в авиационной промышленности накоплен большой опыт применения органопластиков, армированных полимерными волокнами, для изготовления деталей конструкционного и функционального назначения. Конструкционные арамидные органопластики позволили создать легкие обшивки, стойкие к ударным и эрозийным повреждениям, воздействию длительных и усталостных нагрузок. Из органопластиков выполнены слабо- и средненагруженные элементы самолетов Ту-204, Ту-334, вертолетов «Ансат», Ка-62 и др.

Конструкционные органопластики последнего поколения (ВКО-24, ВКО-25) на основе новых марок арамидных волокон Русар-НТ обладают высоким уровнем механических свойств и максимальной устойчивостью к поглощению влаги ($\leq 1,5\%$). Органопластик ВКО-25 изготавливается с использованием связующего ВСЭ-34, применяется совместно со стекло- и углепластиковыми на основе данного связующего. Сохранение механических свойств органопластика ВКО-25 после воздействия широкого спектра климатических факторов составляет $\geq 90\%$, что позволяет рассматривать его в качестве материала для изделий, эксплуатируемых во всеклиматических условиях.

Антифрикционные органопластики, разработанные специалистами НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, применяются во многих конструкциях тяжело нагруженных узлов трения скольжения самолетов и вертолетов, обеспечивают работоспособность подшипников без смазки в течение всего периода эксплуатации. Для армирования антифрикционных органопластиков используются ткани сложной текстильной структуры, содержащие наряду с политетрафторэтиленовыми (ПТФЭ) волокнами также высокопрочные полиимидные, полиоксадиазольные и др. В процессе трения ПТФЭ-волокна формируют на поверхности контакта тонкую самосмазывающуюся пленку, образующуюся благодаря кристаллической структуре, способной к многократному деформированию без накопления остаточных деформаций. Антифрикционный органопластик марки Оргалон АФ-1М применяют для изготовления шарниров системы управления и стоек шасси, роликов и шарниров предкрылка и закрылка самолета, подшипников опоры крыла, шарниров крепления демпфера лопастей самолетов и вертолетов и др. [13].

В конструкциях самолетов ОКБ Сухого имеется ряд деталей, в которых целесообразно сочетать конструкционные и антифрикционные органопластики для повышения эффективности эксплуатации изделия. Это так называемые гибкие элементы – обводообразующие детали каркаса планера, которые устанавливаются в зонах навески

механизации самолета [14–16]. Гибкие элементы обеспечивают создание аэродинамического контура при всех рабочих углах отклонения механизации за счет перекрытия щелей и зазоров между каркасом и механизацией. Отсутствие (минимизация) таких зазоров при любых углах отклонения является необходимым условием для обеспечения эффективной работы элементов механизации, а также для снижения радиолокационной заметности и повышения аэродинамического качества самолета.

На рис. 1 представлена схема установки гибкого элемента в конструкции. Гибкие элементы изготавливаются с предварительно увеличенной кривизной (преднатягом), обусловленной значением вертикального перемещения задней кромки гибкого элемента и допусками на зазор. Гибкий элемент деформируется при контакте с ответной частью элемента механизации (обтекателем/лобовиком) и обеспечивает непрерывный прижим по задней кромке к отклоняемой поверхности механизации [17].

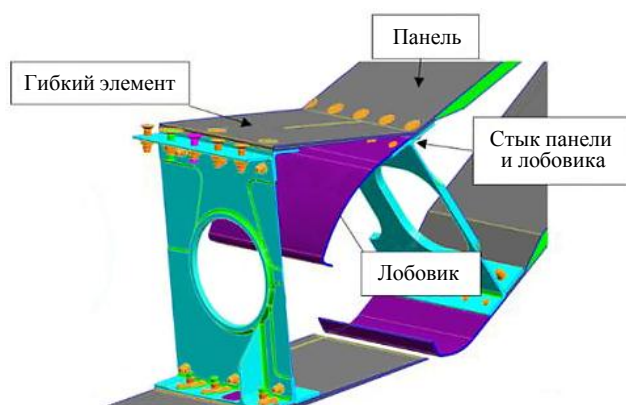


Рис. 1. Схема установки гибкого элемента в конструкции [17]

При эксплуатации гибких элементов в составе авиационных конструкций возникает ряд проблем:

- гибкий элемент находится в постоянном контакте с подвижными элементами механизации, при этом образуется пара трения, вследствие чего происходит износ конструкции;
- под действием различных видов нагружения появляются остаточные деформации гибкого элемента, которые могут привести к появлению зазоров между каркасом и механизацией.

Данная работа направлена на исследование износостойкости и деформации в процессе эксплуатации гибких элементов аэродинамического управления самолета, изготовленных из разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ органопластиков. Представлены результаты опробования технологии изготовления гибких элементов с применением препрегов конструкционного и антифрикционного органопластиков, а также результаты испытаний, подтверждающие эффективность антифрикционного покрытия для снижения износа конструкции.

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

Материалы и методы

Объектами исследования являются препреги конструкционного и антифрикционного органопластиков, органопластики и конструктивно-подобные образцы (КПО), изготовленные из них. В качестве армирующего наполнителя в конструкционном органопластике использовали ткань сатинового переплетения с поверхностной плотностью

90 г/м² из арамидной нити Руслан с линейной плотностью 14,3 текс. Для армирования антифрикционного органопластика использовали комбинированную ткань с поверхностной плотностью 300 г/м², содержащую нити ПТФЭ.

Препреги конструкционного и антифрикционного органопластиков получали путем пропитки расплавом модифицированного эпоксидного связующего. Содержание связующего составило 50 и 20 % для конструкционного и антифрикционного препрегов соответственно.

Из препрегов изготавливали образцы для проведения лабораторных испытаний и КПО гибких элементов для исследования износостойкости и величины остаточной деформации на испытательных стендах.

Конфигурация и схема армирования КПО гибких элементов выбраны с учетом опыта ОКБ Сухого в проектировании элементов механизации летательных аппаратов и сопряженных агрегатов. В соответствии с разработанными чертежами проводили сборку заготовок из слоев препрега конструкционного органопластика с поверхностным слоем препрега антифрикционного органопластика и без него. На рис. 2 показан внешний вид заготовок, собранных из слоев препрега.

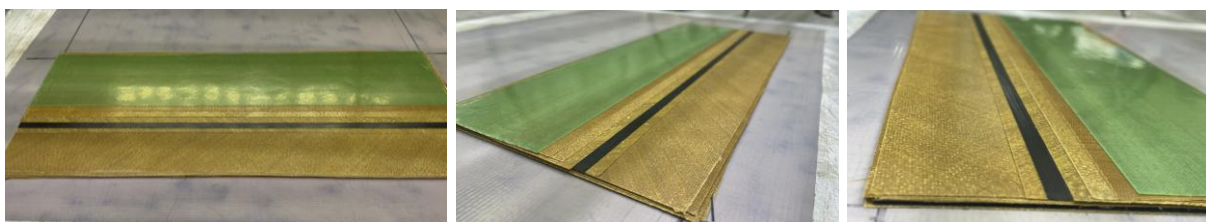


Рис. 2. Общий вид пакета-заготовки конструктивно-подобного образца гибкого элемента

Формование КПО проводили в автоклаве при повышенных значениях температуры и давления в соответствии с температурно-временными параметрами отверждения эпоксидного связующего.

Трибологические испытания проводили на лабораторной установке И-47 в режиме сухого трения на воздухе при температуре 20 °С. Вид сопряжения – торцевое трение двух цилиндрических образцов. В качестве контртела применяли сталь марки 30ХГСА, а также углепластик на основе высокопрочных углеродных волокон и эпоксидного связующего. Линейная скорость скольжения составила 0,15 м/с, удельная нагрузка (контактное давление): 3,0 МПа, продолжительность испытаний: 60 мин.

Испытания КПО по оценке износостойкости проводили на специализированном испытательном стенде при частоте нагружения от 0,5 до 1,0 Гц. Максимальное количество циклов нагружения составило 768000. Условия проведения испытаний на износостойкость: температура окружающей среды – от 10 до 30 °С, относительная влажность воздуха – от 45 до 85 %.

Испытания КПО для определения величины остаточных деформаций после нагружения проводили на стенде с использованием специальных приспособлений.

Результаты и обсуждение

Совместное формование препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков

Препрег антифрикционного органопластика имеет типовые органолептические показатели, свойственные препрегам на основе расплавных связующих и тканых наполнителей. Препреги пригодны для работы методом ручной выкладки при сборке заготовок. Типовые технологические операции с препрегом (размотка с катушки,

раскрой, ручные послойные выкладка и прикатка) не требуют специализированного оборудования и инструментов.

Для оценки совместимости препрегов осуществляли сборку пакета из 20 слоев препрега конструкционного органопластика и одного слоя антифрикционного препрега в качестве верхнего слоя заготовки. Далее проведено формование пакета-заготовки препрегов автоклавным методом. Внешний осмотр и акустический контроль отвержденного органопластика с антифрикционным покрытием показал отсутствие дефектов и расслоений. На рис. 3 представлен гибкий элемент из арамидного органопластика с нанесенным антифрикционным покрытием.



Рис. 3. Гибкий элемент из арамидного органопластика с нанесенным антифрикционным покрытием [18]

Проведенные работы по совместному формованию препрегов подтвердили технологическую реализуемость изготовления конструкций гибких элементов с антифрикционным покрытием в условиях опытного производства ОКБ Сухого.

Испытания на трение и износостойкость

Гибкие элементы при эксплуатации контактируют с элементами каркаса и подвижными элементами механизации, образуя пары трения. Силы трения имеют переменный характер: чем больше отклонение элемента от среднего положения, тем большие значения усилия и силы трения, вызывающие изнашивание контактирующих поверхностей, возникают. Материалы для изготовления гибких элементов должны обеспечивать минимальное изнашивание деталей конструкции.

Для оценки эффективности применения антифрикционного материала (на основе ткани, включающей ПТФЭ-волокна) в составе гибкого элемента предварительно проведены сравнительные лабораторные испытания органопластиков (конструкционного арамидного и антифрикционного) в составе различных пар трения.

В результате испытаний на лабораторной установке трения определены триботехнические характеристики (коэффициент трения и весовой износ) органопластиков. Интенсивность весового износа определяли как удельный весовой износ органопластиков (конструкционного или антифрикционного) после испытаний на трение в сравнении с соответствующими исходными материалами (см. таблицу).

Триботехнические свойства органопластиков (средние значения) [17]

Пара трения	Коэффициент трения	Интенсивность весового износа
Арамидный органопластик–сталь	0,18	$2,5 \cdot 10^{-6}$
Антифрикционный органопластик–сталь	0,06	Без износа
Антифрикционный органопластик–углепластик	0,08	$0,01 \cdot 10^{-8}$

Лабораторные триботехнические испытания показали эффективность антифрикционного органопластика в сравнении с арамидным конструкционным органопластиком. При заданных условиях испытаний коэффициент трения пары «арамидный органопластик–сталь» составляет 0,18, что в 3 раза больше по сравнению с парой трения «антифрикционный органопластик–сталь». Проведенные исследования подтверждают целесообразность использования антифрикционного покрытия в конструкции гибкого элемента.

Лабораторные триботехнические испытания позволяют получить только сравнительную оценку износостойкости материалов. Для анализа работоспособности антифрикционного органопластика в качестве покрытия гибких элементов в заданных условиях проводили испытания КПО на износостойкость и ресурс на испытательном стенде, позволяющем имитировать реальные эксплуатационные нагрузки.

Перед испытаниями КПО гибких элементов закрепляли на пластину, предназначенную для неподвижной установки образцов на стенде. На рис. 4 показан общий вид КПО в сборке с пластиной. Испытаниям подвергали КПО с антифрикционным покрытием и без него.

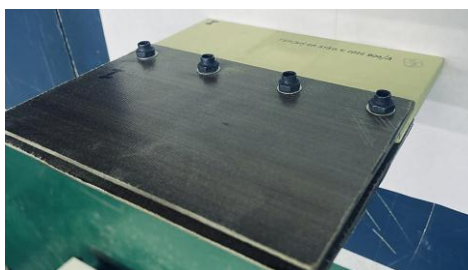


Рис. 4. Общий вид конструктивно-подобного образца гибкого элемента в сборке с пластиной

Подвижная часть стенда представляет собой клин (рис. 5), форма которого при движении обеспечивает различные углы отклонения КПО гибкого элемента, закрепленного неподвижно на стенде. Клин выполнен из алюминиевого сплава с твердым анодным покрытием.



Рис. 5. Вид подвижного элемента (клина) в составе стенда для испытаний

После прохождения половины циклов нагружений КПО снимали с приспособлений, проводили визуальный контроль внешнего вида и целостности поверхностных слоев КПО и клина, который подтвердил отсутствие повреждений. Далее испытания продолжали до полного цикла.

После проведения всего цикла испытаний КПО снимали с приспособления и подвергали внешнему осмотру. Повреждений КПО не обнаружено. На композиционных КПО произошла контактная приработка по краям, царапин и прочих дефектов не выявлено.

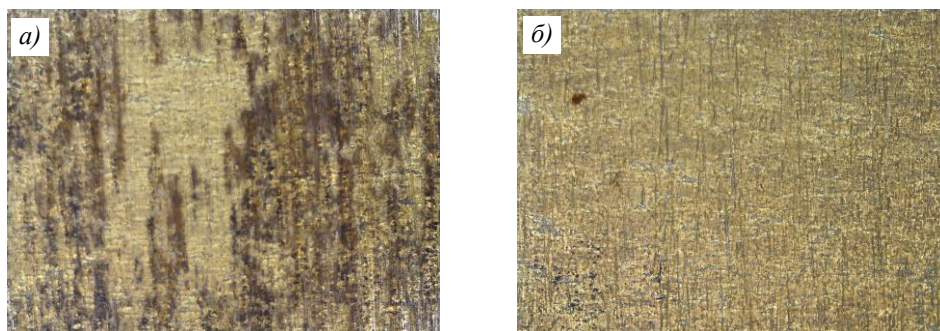


Рис. 6. Поверхности клина после испытаний на износ в паре трения с конструктивно-подобным образцом гибкого элемента с антифрикционным покрытием (а) и без него (б)

Для оценки степени износа ответных поверхностей (клина) проведены сравнительные измерения шероховатости до и после проведения испытаний на износ в паре трения с КПО гибких элементов. Анализ состояния поверхности клина после испытаний на износ в контакте с антифрикционным органопластиком в качестве верхнего слоя КПО гибкой обшивки показал, что на поверхности клина присутствуют следы полимера черного цвета, перенесенного с композиционной обшивки (рис. 6). Признаков повреждений и износа поверхности клина не наблюдали. Таким образом, в соответствии с механизмом трения, реализуемым в полимерных материалах, в процессе трения на контртело осуществлен массоперенос ПТФЭ, входящего в состав антифрикционного покрытия, с образованием тонкого самосмазывающегося слоя. Если антифрикционное покрытие на КПО гибкого элемента отсутствует, то поверхность клина после испытаний имеет следы износа, наблюдаются отдельные признаки повреждения твердого анодного покрытия, присутствуют участки с «металлическим блеском» и следы наноса полимера на поверхность клина.

Исследование возможности восстановления поврежденного антифрикционного покрытия

Помимо технологий изготовления деталей с применением препрегов конструкционных и антифрикционных органопластиков, в данной работе исследована возможность восстановления поврежденного антифрикционного покрытия на гибких элементах. С этой целью получены образцы конструкционного арамидного органопластика с антифрикционным слоем. Препрег антифрикционного органопластика формовали на поверхности отвержденного арамидного органопластика двумя методами – вакуум-автоклавным и вакуумным. Прочность соединения антифрикционного и конструкционного органопластиков оценивали по значению межслойной прочности при сдвиге, определяемой испытанием образцов на растяжение. Вид образца для проведения испытаний приведен на рис. 7. Результаты испытаний показали высокий уровень прочности при сдвиге данного соединения (2,5–2,8 МПа), что близко к уровню прочности для образцов, изготовленных совместным формованием препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков. Полученные данные подтверждают возможность проведения ремонта антифрикционного покрытия на поврежденных или изношенных гибких обшивках.



Рис. 7. Фрагмент образца для испытаний на прочность при сдвиге, имитирующего ремонтные процедуры [17]

Определение остаточной деформации конструктивно-подобного образца после нагружения

В процессе эксплуатации под воздействием механических нагрузок могут накапливаться повреждения и появляться остаточные деформации в элементах конструкции [19–21].

Появление остаточных деформаций гибких элементов после воздействия эксплуатационных нагрузок – неблагоприятное явление, поскольку может привести к отклонению гибких элементов и, как следствие, неполному перекрытию зазоров между каркасом и механизацией, снижению эффективности работы механизации, ухудшению аэродинамического качества самолета.

Для решения этой проблемы исследовано влияние схемы армирования органо-пластика на деформационные свойства КПО гибкого элемента из препрега. Для выбора рациональной схемы армирования, обеспечивающей минимальный уровень остаточных деформаций после нагружения, проведены испытания на стенде (рис. 8). Перед испытаниями КПО проходили неразрушающий контроль на отсутствие механических дефектов и повреждений.

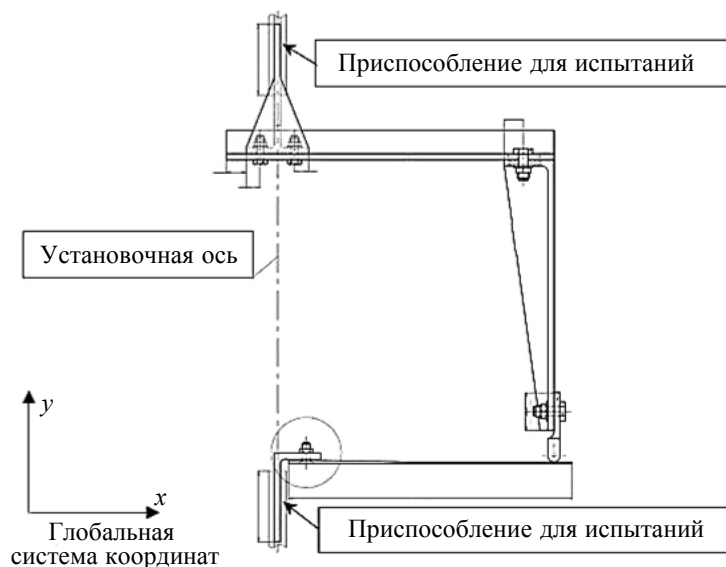


Рис. 8. Схема испытательного стенда [17]

Закрепление на стенде осуществляли путем соединения КПО с профилем с помощью механического крепежа. Нагружение проводили принудительным перемещением упора вдоль установочной оси по направлению к профилю. Происходило поэтапное нагружение принудительными перемещениями упора $\Delta y = 2, 4, 6, 8$ мм и $\Delta y = 3, 6, 9, 12$ мм для КПО длиной 100 и 150 мм соответственно. На рис. 9 показана зависимость действующей силы в упоре от перемещения самого упора.

После каждого нагружения КПО разгружали и определяли остаточные перемещения свободной кромки. Эти перемещения свидетельствуют о наличии остаточной деформации КПО после снятия нагрузки и позволяют определить ее величину. На рис. 10 приведена зависимость остаточных перемещений свободной кромки КПО от принудительного перемещения упора при нагружении.

Проведенные испытания позволили установить наличие остаточных деформаций КПО гибких элементов после нагружения и разгрузки на испытательном стенде. Показано, что при увеличении перемещения упора при нагружении закономерно повышается остаточная деформация. Наличие остаточных деформаций в КПО после нагружения и разгрузки (в частности при консольном изгибе, как это показано в данной

работе) свойственно полимерным композиционным материалам и является следствием различных факторов: химической природы полимерной матрицы, релаксации внутренних напряжений, накопления микрповреждений в объеме композита и т. д. [22–27].

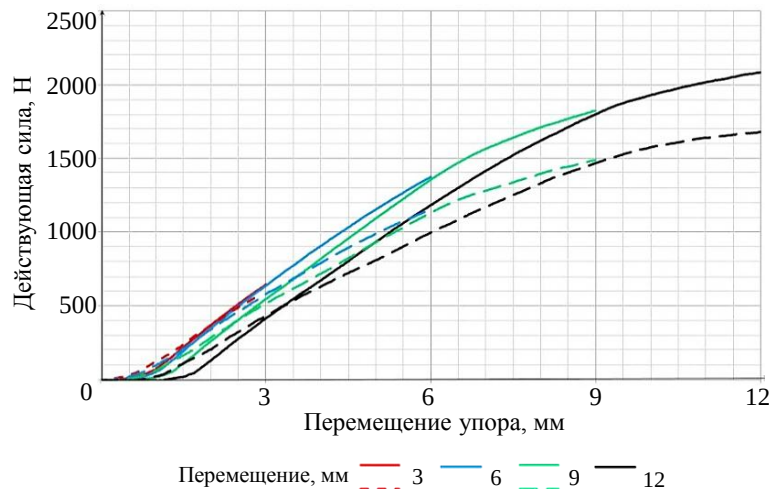


Рис. 9. Зависимости действующей силы от перемещений упора при нагружении конструктивно-подобного образца из препрега органопластика со схемой армирования $[0, 90]$ (—) и $[0, -45, 45, 90]$ (---) [17]

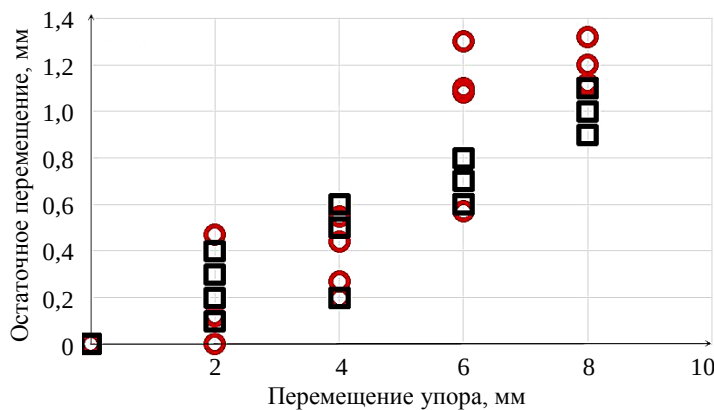


Рис. 10. Зависимость остаточных перемещений свободной кромки от перемещений упора при нагружении конструктивно-подобного образца из препрега органопластика со схемой армирования $[0, 90]$ (○) и $[0, -45, 45, 90]$ (□) [17]

Установлено, что уровень остаточной деформации зависит от схемы армирования конструкционного органопластика. При схеме армирования $[0, -45, 45, 90]$ отмечены меньшие остаточные деформации по сравнению со схемой армирования $[0, 90]$ при нагружении КПО, соответствующем $\Delta y = 6$ и больше.

Заключения

Проведено технологическое опробование и подтверждена реализуемость технологии изготовления гибких элементов деталей аэродинамического управления самолета путем совместного формования препрегов антифрикционного и конструкционного органопластиков.

Проведены испытания КПО на износостойкость в паре трения с алюминиевым сплавом. Установлено, что использование антифрикционного органопластика в качестве покрытия обеспечивает износостойкость гибких элементов и ответной поверхности из

алюминиевого сплава с твердым анодным покрытием в течение заданного ресурса. Экспериментально подтверждено, что наличие антифрикционного покрытия в паре трения возвратно-поступательного типа создает благоприятные условия для значительного увеличения ресурса при трении подвижных элементов механизации и неподвижных частей теоретического контура летательных аппаратов.

Показана возможность восстановления поврежденного антифрикционного покрытия на гибких элементах из арамидного органопластика с использованием препрега антифрикционного органопластика. Ремонт осуществляется путем приформовывания препрега к отвержденному органопластику методами вакуумного и вакуум-автоклавного формования.

Определены рациональные конфигурации и схемы армирования гибких элементов, позволяющие минимизировать уровень остаточных деформаций при эксплуатации.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
2. Каблов Е.Н., Шевченко Ю.Н., Гриневич А.В. Проблемы паспортизации авиационных материалов на современном этапе // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. С. 388–396.
3. 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.
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: 26.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения в авиационных конструкциях слоистых металлополимерных материалов на основе алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Гуняева А.Г., Курносков А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Сагомонова В.А., Целикин В.В. Вибропоглощающий материал с перфорированным армирующим слоем // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
8. Сидорина А.И. Тканые металлоуглеродные армирующие наполнители для ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
9. 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: 01.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
10. Гуртовик И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2002. 368 с.
11. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.В. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 100–117. DOI: 10.18287/22541-7533-2018-17-1-100-117.

12. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364.
13. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Левакова Н.М. Антифрикционные органопластики для высоконагруженных узлов трения // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
14. Насонов Ф.А., Кулагина Г.С., Демина А.С., Железина Г.Ф., Морозов Б.Б., Соловьева Н.А., Шульдешова П.М. Применение композитов со специальными самосмазывающимися антифрикционными покрытиями в авиационной отрасли // Мат. XLIII Всерос. конф. «Наука и технологии»: в 2 т. М.: РАН, 2023. Т. 1. С. 21–27.
15. Михайлов Ю.С. Повышение эффективности механизации стреловидного крыла // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 6. С. 101–118. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120.
16. Су-57 – российский истребитель пятого поколения. URL: https://dzen.ru/a/YW4C16Kc_DqzBOeC (дата обращения: 01.02.2024).
17. Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф., Демина А.С., Соловьева Н.А., Морозов Б.Б., Шульдешова П.М., Филатов А.А. Технология гибких элементов конструкций самолетов разработки ОКБ Сухого с применением препрегов антифрикционных и конструкционных органопластиков // Мат. XLIV Всерос. конф. «Наука и технологии», посв. 300-летию РАН и 100-летию академика В.П. Макеева: в 2 т. М.: РАН, 2024. Т. 1. С. 91–99.
18. Лучшие самолеты Сухого: документальный сериал. Вып.: Су-57 (эфир от 04.12.2023) // Телеканал «Звезда»: офиц. сайт. URL: <https://tvzvezda.ru/video/films-online/20241301629-InBa9.html/20231241017-6J1p9.html> (дата обращения: 01.02.2024).
19. Акулин П.В. Накопление повреждений в композиционных панелях при малоцикловом нагружении // Вестник МАИ. 2023. Т. 30. № 2. С. 84–90. DOI: 10.34759/vst-2023-2-84-90.
20. Soborejo A.B.O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials at high temperatures // Proc. Internat. Conf. «Strength of Metals and Alloys». Tokyo, 1967. P. 252–256.
21. Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials // Proc. of conference «Damage in composite materials: Simulation and non-destructive testing». Stuttgart, 2006. P. 23–26.
22. Мовчан А.А. Микромеханический подход в задаче описания накопления анизотропного рассеянного урона // Механика твердого тела. 1990. № 3. С. 252–256.
23. Мовчан А.А. Проблема прочности тонкостенных конструкций. М.: Изд-во МАИ, 1989. С. 20–24.
24. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Влияние внутренних напряжений на старение полимерных композиционных материалов. Обзор // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 5. С. 805–822.
25. 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: 29.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
26. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
27. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Ползучесть армированных пластиков. М.: Химия, 1982. 214 с.

References

1. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a single information and analytical center for aviation materials in the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
2. Kablov E.N., Shevchenko Yu.N., Grinevich A.V. Problems of certification of aviation materials at the present stage. *75 years. Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2007*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2007, pp. 388–396.

3. 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.
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: January 26, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N., Nefedova Yu.N. Perspectives of application of fiber metal laminate materials based on aluminum alloys in aircraft design. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 45–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-45-53.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
7. Sagomonova V.A., Tselikin V.V. Vibration damping material with perforated constraining layer. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-125-133.
8. Sidorina A.I. Woven metal-carbon reinforcing fillers for PCM. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-101-113.
9. 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: March 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
10. Gurtovik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radio-transparent products made of fiberglass*. Moscow: Mir, 2002, 368 p.
11. Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.V. Selection of materials for the manufacture of dimensionally stable load-bearing structures. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 100–117. DOI: 10.18287/22541-7533-2018-17-1-100-117.
12. Zhelezina G.F., Voynov S.I., Solovieva N.A., Kulagina G.S. Aramid organotextolites for impact-resistant aircraft structures. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2019, vol. 92, is. 3, pp. 358–364.
13. Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Levakova N.M. Antifriction organoplastics for high-loaded friction knots. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 14, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
14. Nasonov F.A., Kulagina G.S., Demina A.S., Zhelezina G.F., Morozov B.B., Solovyova N.A., Shuldeshova P.M. Application of composites with special self-lubricating antifriction coatings in the aviation industry. *XLIII All-Russian. conf. «Science and Technology»*: in 2 vols. Moscow: RAS, 2023, vol. 1, pp. 21–27.
15. Mikhailov Yu.S. Increasing the efficiency of swept wing mechanization. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 101–18. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120.
16. Su-57 – Russian fifth-generation fighter. Available at: https://dzen.ru/a/YW4C16Kc_DqzBOeC (accessed: February 01, 2024).
17. Kulagina G.S., Nasonov F.A., Zhelezina G.F., Demina A.S., Solovieva N.A., Morozov B.B., Shuldeshova P.M., Filatov A.A. Technology of flexible structural elements of aircraft developed by Sukhoi Design Bureau using prepregs of antifriction and structural organoplastics. *XLIV All-Rus. Conf. «Science and Technology», dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences and the 100th anniversary of Academician V.P. Makeev*: in 2 vols. Moscow: RAS, 2024, vol. 1, pp. 91–99.
18. *The Best Sukhoi Aircraft*: Documentary Series. Issue: Su-57 (broadcast on 04.12.2023). Zvezda TV Channel: official website. Available at: <https://tvzvezda.ru/video/films-online/20241301629-InBa9.html/20231241017-6J1p9.html> (accessed: February 01, 2024).

19. Akulin P.V. Accumulation of Damage in Composite Panels under Low-Cycle Loading. *Vestnik MAI*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 4–90. DOI: 10.34759/vst-2023-2-84-90.
20. Soborejo A.B.O. Use of entropy principles in estimating reliability functions for creep rupture characteristics of engineering materials at high temperatures. *Proc. Internat. Conf. «Strength of Metals and Alloys»*. Tokyo, 1967, pp. 252–256.
21. Dudchenko A.A., Lurie S.A., Halim K. Multiscale modeling on damage mechanics of laminated composite materials. *Proc. of conference «Damage in composite materials: Simulation and non-destructive testing»*. Stuttgart, 2006, pp. 23–26.
22. Movchan A.A. Micromechanical approach to the problem of describing the accumulation of anisotropic scattered damage. *Mekhanika tverdogo tela*, 1990, no. 3, pp. 252–256.
23. Movchan A.A. *Problem of strength of thin-walled structures*. Moscow: MAI Publ. House, 1989, pp. 20–24.
24. Kablov E.N., Startsev V.O. Effect of internal stresses on the aging of polymer composite materials. Review. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 805–822.
25. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
26. Vasiliev V.V. *Mechanics of structures made of composite materials*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 272 p.
27. Skudra A.M., Bulavs F.Ya. *Creep of reinforced plastics*. Moscow: Khimiya, 1982, 214 p.

Информация об авторах

Кулагина Галина Серафимовна, начальник сектора, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Насонов Федор Андреевич, ведущий технолог 3 класса, к.т.н., ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

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

Демина Анна Сергеевна, инженер-технолог 1 категории, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Соловьева Наталия Александровна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозов Борис Борисович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения – начальник отдела, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Шульдешова Полина Михайловна, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Филатов Андрей Анатольевич, главный конструктор – начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, info@su.uacrussia.ru

Information about the authors

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

Fedor A. Nasonov, Third Class Leading Technologist, Candidate of Sciences (Tech.), PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

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

Anna S. Demina, First Category Engineer-technologist, PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

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

Boris B. Morozov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau – Head of Division, PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Polina M. Shuldeshova, First Category Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Filatov, Chief Designer – Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), PJSC «UAC» EDB Sukhoi, info@su.uacrussia.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ПЛАСТИН УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА

М.С. Иванов¹, В.С. Морозова¹, Н.Г. Павлюкович¹

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

Аннотация. Исследована зависимость свойств консолидированных пластин термопластичного углепластика на основе полиэфирэфиркетона и тканого углеродного наполнителя от технологических параметров изготовления: давления и температуры прессования, показателя текучести расплава полиэфирэфиркетона при данной температуре, скорости охлаждения отформованного углепластика и температуры снятия нагрузки при охлаждении. Оценка влияния технологических параметров формования на уровень консолидации пластин углепластика осуществлена с применением неразрушающих методов контроля и путем определения механических свойств.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, углепластик, температура прессования, давление прессования, показатель текучести расплава, прочность

Для цитирования: Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние технологических режимов изготовления на свойства консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.

Scientific article

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES OF MANUFACTURE ON PROPERTIES OF CONSOLIDATED PLATES OF CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC BASED ON POLYETHERETHERKETONE

M.S. Ivanov¹, V.S. Morozova¹, N.G. Pavlukovich¹

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

Abstract. In the article has been studied dependence of properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone and woven carbon filler on the technological parameters of manufacture: pressure and temperature of pressing, time and cooling rate under pressure, as well as the melt flow rate of polyetheretherketone at a given temperature. The influence of technological molding parameters on the level of consolidation of carbon fiber reinforced thermoplastic plates was assessed using non-destructive testing methods and by determination of their mechanical properties.

Keywords: polyetheretherketone, carbon fiber, pressing temperature, pressing pressure, melt flow rate, strength

For citation: Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. Influence of technological modes of manufacture on properties of consolidated plates of carbon fiber reinforced thermoplastic based on polyetheretherketone. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-60-69.

Введение

На протяжении последних десятилетий в авиакосмической отрасли возрастает интерес к термопластичным полимерным композиционным материалам, в том числе армированным однонаправленными или ткаными углеродными наполнителями (углепластики) [1–6].

В настоящее время в аэрокосмической отрасли в качестве термопластичной матрицы для изготовления высокопрочных углепластиковых конструкций, которые можно долговременно эксплуатировать при повышенных температурах, наиболее широко применяется суперконструкционный термопласт – полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) [7, 8]. Это пожаробезопасный полукристаллический полимер с температурой плавления $\sim 340^\circ\text{C}$ и температурой стеклования $\sim 143^\circ\text{C}$, который обладает превосходными физико-механическими характеристиками – модулем упругости $\sim 3,2$ ГПа, низким влагопоглощением ($\leq 0,15\%$), стойкостью к атмосферным, температурным и механическим воздействиям, а также хорошими диэлектрическими свойствами [9–14] и может сохранять эксплуатационные характеристики вплоть до температур, близких к началу плавления полимерной матрицы ($\sim 300^\circ\text{C}$).

Консолидированные пластины углепластика на основе ПЭЭК изготавливают по препреговой или беспрепреговой (из преформы) технологии с последующей консолидацией (уплотнением, удалением пор) по технологиям прямого прессования или автоклавного формования. Автоклавное формование является наиболее трудо-, материало- и энергоемким, а следовательно, дорогостоящим методом изготовления [15]. Успешность любого технологического процесса определяется его рентабельностью, т. е. снижением производственных издержек или улучшением качества продукции по отношению к альтернативному процессу [16]. В связи с этим отработка технологических режимов прессования крупногабаритных (размером не менее 800×600 мм) консолидированных пластин углепластика на основе ПЭЭК является актуальной задачей.

Применение термопластичного углепластика на основе ПЭЭК разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ для изготовления таких деталей мотогондолы, как кронштейн реверсивного устройства, сектор спрямляющего аппарата, панель внутренняя с рабочей температурой до 150°C перспективных авиационных двигателей, позволит снизить массу изделий не менее чем на 40% по сравнению с алюминиевыми и титановыми сплавами.

На свойства консолидированных пластин и рентабельность процесса прессования оказывают комплексное влияние следующие технологические параметры: температура, вязкость связующего при данной температуре, продолжительность и давление консолидации, а также режим охлаждения углепластика (скорость охлаждения и температура снятия давления).

Технологический процесс переработки термопластов имеет преимущество по времени перед реактопластами благодаря отсутствию растворителя, необходимости продолжительного многоступенчатого отверждения и удаления продуктов реакции. Однако из-за высокой температуры плавления ПЭЭК ($\sim 340^\circ\text{C}$) лимитирующим фактором изготовления углепластика выступает продолжительность нагрева и охлаждения.

Консолидация пластин углепластика методом прессования осуществляется при температуре выше температуры плавления ПЭЭК, при которой обеспечивается наименьшая вязкость связующего, не происходит его активной термодеструкции и при этом сокращается продолжительность нагрева и охлаждения плит пресса, поэтому вязкость связующего и температура прессования находятся в тесной взаимосвязи.

При нагревании заготовки углепластика, особенно выше температуры плавления термопластичного ПЭЭК-связующего, происходит его расширение в соответствии с температурным коэффициентом линейного расширения. При расплавлении на расширение термопластичной матрицы влияет также упругая энергия, накопленная в переплетениях волокна в тканом углеродном наполнителе. При этом толщина ламината увеличивается, появляются поры, поэтому охлаждать заготовку углепластика необходимо под нагрузкой до температуры, при которой возможно извлечь заготовку из оснастки без ее деконсолидации [16, 17].

ПЭЭК относится к хорошо перерабатываемым полимерам, так как имеет широкую температурно-временную область переработки $T_{\min} - T_{\max} \geq 50^\circ\text{C}$ [18] (рис. 1) благодаря высокой термостабильности в экструзионной камере без доступа кислорода (≥ 120 мин при температурах $360\text{--}380^\circ\text{C}$ [19]) и еще лучшей термостойкости, установленной методом термогравиметрического анализа (активная потеря массы начинается при температуре $\geq 550^\circ\text{C}$ [20]). Однако с доступом кислорода происходит термоокислительная деструкция, приводящая к образованию поперечных связей и, соответственно, повышению вязкости.

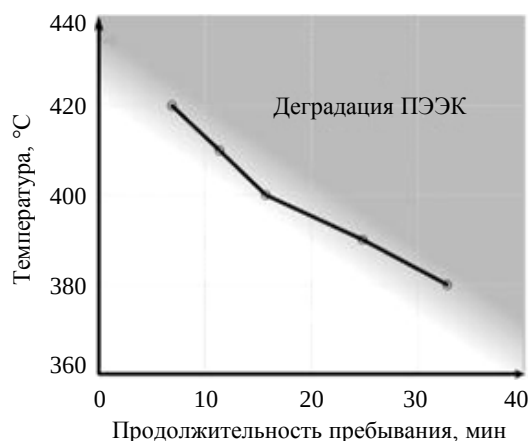


Рис. 1. Температурно-временная область переработки полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) [17]

Поэтому для процесса формования необходимо установить минимальную температуру, при которой будет обеспечиваться эффективная пропитка, что определяется вязкостью связующего или ее обратной величиной — показателем текучести расплава (ПТР), а также удельным давлением прессования, обеспечивающим требуемую толщину монослоя и, соответственно, необходимое содержание связующего. Значимость комплексного исследования влияния данных параметров на деформационно-прочностные характеристики получаемых образцов термопластичных полимерных композиционных материалов (ТПКМ) очень высока.

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

Материалы и методы

В работе использовали:

– порошкообразный ПЭЭК марки ПЭЭК-50П производства АО «Институт пластмасс» (ТУ 20.16.40-565-00209349–2018);

– углеродную ткань саржевого плетения марки АСМ С200Т арт. Сва-12123 производства АО «Юматекс» (ТУ 29.99.14-108-61664530–2018).

Консолидированные пластины ТПКМ изготавливали по беспрепеговой технологии – электростатическое напыление порошка ПЭЭК с одновременной сборкой формовочного пакета и последующим прессованием при повышенных температурах.

Определение ПТР проводили по ГОСТ 11645–2021 (метод А; метод измерения массы) на приборе ПТР-ЛАБ-02 с использованием капилляра диаметром 2,095 мм и с выдержкой под нагрузкой 49,05 Н (5,0 кг) в течение 10 мин при температурах 360, 380 и 400 °С.

Температуру плавления образцов ПЭЭК определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 55134–2012 (атмосфера – азот).

Степень кристалличности образцов ПЭЭК определяли как отношение энтальпии плавления исследуемого образца к энтальпии плавления образца со степенью кристалличности 100 %, равной 130 Дж/г (ГОСТ Р 56757–2015).

Температуру стеклования связующего в углепластике определяли методом динамического механического анализа образцов по ГОСТ Р 57739–2017. Для испытания образцов применяли держатель для трехточечного изгиба со свободной длиной образца 40 мм. Испытания проводили в диапазоне температур от 25 до 220 °С на воздухе при скорости нагрева 5 °С/мин, частоте 1 Гц и амплитуде 10 мкм.

Плотность ТПКМ определяли методом гидростатического взвешивания образцов по ГОСТ 15139–69, массовую долю полимерного связующего – по ГОСТ Р 56682–2015 (метод II).

Ультразвуковой контроль дефектности образцов ТПКМ проводили с использованием ручного дефектоскопа с фазированной решеткой с частотой 5 МГц.

Объемную долю пористости определяли методом рентгеновской компьютерной томографии [21].

Предел прочности образцов ТПКМ при межслойном сдвиге определяли методом испытания короткой балки по ГОСТ 32659–2014. Испытания проводили при температуре 23 °С и скорости нагружения 1 мм/мин.

Предел прочности при трехточечном изгибе оценивали по ГОСТ Р 56805–2014 (метод А). Испытания проводили при температуре 23 °С и скорости нагружения 2 мм/мин.

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

Результаты и обсуждение

Важнейшими технологическими параметрами изготовления ТПКМ являются давление, температура прессования и ПТР термопластичной матрицы при этой температуре. Согласно ТУ, температура плавления ПЭЭК марки ПЭЭК-50П превышает 340 °С, а значения ПТР при 380 °С должны находиться в интервале от 50 до 120 г/10 мин. В данной работе использовали два образца ПЭЭК-50П, ПТР которых при 380 °С составил 73 (образец 1) и 92 г/10 мин (образец 2).

Для образца 2 определена зависимость ПТР от температуры. На рис. 2 приведены значения ПТР связующего при температурах 360, 380 и 400 °С.

Наибольшее увеличение ПТР (на 25 %) наблюдается при температуре от 360 до 380 °С, а при повышении температуры до 400 °С зафиксировано увеличение только на 8 %. Следует отметить, что с точки зрения технологии изготовления углепластика любое повышение температуры влечет за собой увеличение продолжительности нагрева и последующего охлаждения.

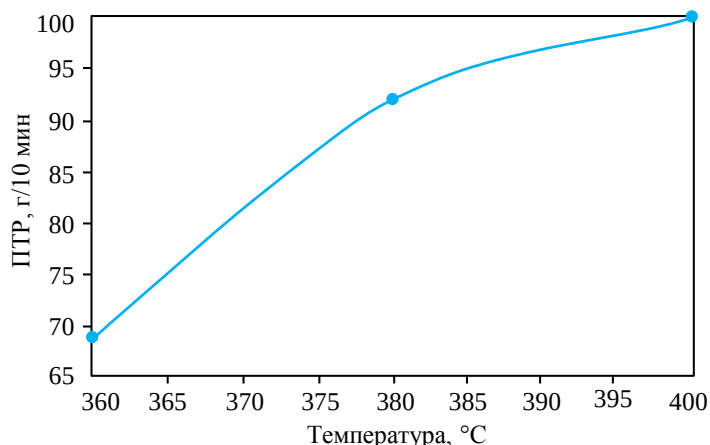


Рис. 2. Зависимость показателя текучести расплава (ПТР) полиэфирэфиркетона марки ПЭЭК-50П от температуры

Методом ДСК определено влияние скорости охлаждения расплава ПЭЭК (образец 2) 1,5; 10 и 50 °C/мин на температуру плавления и степень кристалличности (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость температуры плавления и степени кристалличности от скорости охлаждения полиэфирэфиркетона

Характеристика	Значения характеристик при скорости охлаждения, °C/мин		
	1,5	10	50
Температура плавления, °C	347	345	343
Площадь пика плавления, Дж/г	47,18	44,26	42,85
Степень кристалличности, %	36,3	34,0	33,0

Снижение скорости охлаждения расплава до 1,5 °C/мин приводит к увеличению температуры плавления полимера и степени кристалличности.

С использованием двух образцов ПЭЭК при различных значениях температуры, давления прессования и температуры охлаждения под давлением изготовлены консолидированные пластины углепластика с укладкой [0]₆, из которых получены образцы с направлением вырезки [0]. Режимы изготовления приведены в табл. 2. Характеристики консолидированных пластин углепластика приведены в табл. 3.

Таблица 2

Технологические режимы изготовления консолидированных пластин углепластика на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК)

Характеристика	Значения характеристик для пластин			
	КПУ-1	КПУ-2	КПУ-3	КПУ-4
Образец ПЭЭК	1	2		
Показатель текучести расплава ПЭЭК, г/10 мин	71	92	69	92
Температура прессования, °C	380	380	360	380
Давление прессования, МПа	1,0	1,0	1,0	0,2

Таблица 3

Свойства образцов консолидированных пластин углепластика

Характеристика	Значения характеристик для пластин			
	КПУ-1	КПУ-2	КПУ-3	КПУ-4
Толщина, мм	1,36	1,34	1,38	1,52
Толщина монослоя, мм	0,23	0,22	0,23	0,25
Плотность, г/см ³	1,51	1,53	1,48	1,48
Массовая доля связующего, %	41	41	41	47
Объемная доля связующего, %	50	49	51	55
Температура стеклования, °С	134	132	134	135
Предел прочности при изгибе, МПа	908	941	853	835
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	73,7	75,9	63,6	78,1

Высокий уровень консолидации пластин углепластика подтвержден физическими свойствами (высокой плотностью и небольшой толщиной монослоя), а также результатами неразрушающего контроля (при проведении ультразвуковых исследований дефектов не обнаружено). Объемная доля пор, определенная методом рентгеновской компьютерной томографии, составляет $\leq 0,12$ %.

Пластины КПУ-2 и КПУ-3 изготовлены на основе образца 2, но при температурах прессования 360 и 380 °С, соответственно расплав ПЭЭК имел различный ПТР. Сравнение результатов испытаний показывает, что при более низкой вязкости связующего получают консолидированные пластины с меньшей толщиной монослоя, большей объемной плотностью и более высоким уровнем физико-механических характеристик. Пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге для консолидированных пластин, полученных при температуре 380 °С, больше на 10 и 16 % соответственно, чем для консолидированных пластин, изготовленных при температуре 360 °С. Полученные данные коррелируют со снижением ПТР на 25 % для образцов, изготовленных при температуре 360 °С, по сравнению с образцами, выработанными при 380 °С. Это подтверждает зависимость физических и механических свойств консолидированных пластин углепластика от вязкости связующего при температуре прессования.

Технологические режимы изготовления образцов КПУ-2 и КПУ-4 различаются давлением прессования при одинаковых значениях температуры и, соответственно, ПТР связующего. Анализ результатов, полученных для этих образцов консолидированных пластин углепластика, показывает, что снижение давления прессования заметно сказывается на толщине монослоя пластин и содержании связующего в них. Значения данных характеристик увеличиваются на 13–15 %.

Сравнение характеристик пластин КПУ-1, КПУ-2 и КПУ-3 позволяет выявить закономерность влияния ПТР связующего. Образцы изготовлены при одинаковом давлении, но при разной температуре и из разных образцов ПЭЭК-связующего. Однако все исследованные свойства находятся в четкой зависимости от величины ПТР. Чем выше текучесть расплава, тем меньше толщина, больше плотность и выше физико-механические показатели консолидированных пластин углепластика при изгибе и межслойном сдвиге.

Для определения влияния режима охлаждения, а именно температуры снятия нагрузки при охлаждении углепластика, изучены свойства пластин, изготовленных из образца 1 при температуре 380 °С под давлением 1 МПа, охлажденных при этой же нагрузке, извлеченных из оснастки при достижении различной температуры (340, 310, 280 и 90 °С). Свойства полученных пластин углепластика представлены в табл. 4.

**Свойства консолидированных пластин углепластика,
извлеченных из оснастки при различной температуре**

Характеристика	Значения характеристик при температуре извлечения, °С			
	340	310	280	90
Температура стеклования, °С	144	146	138	135
Предел прочности при изгибе, МПа	600	610	978	1090
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	25,0	36,0	79,1	84,7

Температура, при которой происходит снятие нагрузки (извлечение углепластика из оснастки), оказывает значительное влияние на деформационно-прочностные свойства консолидированных пластин углепластика. При снижении температуры извлечения с 340 до 280 °С пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге увеличиваются более чем в 1,5 и 3 раза соответственно. Дальнейшее снижение температуры извлечения оказывает существенно меньшее влияние: прочностные характеристики пластин углепластика, извлеченных при температурах 280 и 90 °С, изменяются в пределах 8–12 %. Таким образом, установлено, что для получения консолидированных пластин углепластика с высоким уровнем деформационно-прочностных свойств необходимо охлаждение под нагрузкой при температуре ≤ 280 °С.

Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что для разработки наиболее рентабельного режима изготовления пластин углепластика необходим подбор минимальной температуры переработки ПЭЭК-связующего с оптимальным для пропитки тканого углеродного наполнителя ПТР на уровне ~ 70 г/10 мин.

Высокий уровень консолидации пластин углепластика при температуре 360 °С подтвержден неразрушающими методами контроля: объемная доля пор не превышает 0,12 %. При этом следует отметить, что сниженная вязкость ПЭЭК-связующего влияет на плотность и толщину монослоя, а также на пределы прочности при изгибе и межслойном сдвиге углепластика, которые снижаются на 10 и 16 % соответственно по сравнению с образцом, изготовленным при температуре 380 °С.

Снижение удельного давления прессования на 80 % значительно влияет на толщину монослоя и содержание связующего в образце углепластика. Обе характеристики увеличиваются на 13–15 %.

Все исследованные свойства находятся в четкой зависимости от величины ПТР. При повышении текучести расплава толщина консолидированных пластин углепластика уменьшается, а плотность и физико-механические показатели при изгибе и межслойном сдвиге увеличиваются.

Методом ДСК обнаружено, что снижение скорости охлаждения расплава до 1,5 °С/мин вызывает увеличение температуры плавления полимера и степени кристалличности.

Определена максимальная температура охлаждения (280 °С) под давлением для получения консолидированных пластин углепластика с высокими деформационно-прочностными свойствами.

Список источников

1. 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: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

2. 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: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. 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: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н. Конструкционные углепластики на рубеже веков // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 242–247.
5. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
8. Иванов М.С., Сорокин А.Е. Листовой термопластичный углепластик на основе полиэфирэфиркетона для изготовления деталей мотогондолы авиационного двигателя методом термоформования // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. Ст. 03.
9. Беев А.А., Хаширова С.Ю., Беева Д.А., Шокумова М.У. Порошкообразные ароматические полиэфирэфиркетоны и сополиэфирэфиркетоны // Пластические массы. 2022. № 7–8. С. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-7-8-6-9.
10. Микитаев А.К., Саламов А.Х., Беев А.А., Беева Д.А. Наполнение полиэфирэфиркетонов (ПЭЭК) как способ получения композитов с высокими эксплуатационными свойствами // Пластические массы. 2017. № 5–6. С. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-5-6-6-9.
11. Ляшенко Е.Ю., Яковлева К.А., Андреева Т.И. и др. Композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетона // Пластические массы. 2023. № 1–2. С. 11–13. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-11-13.
12. Хараев А.М., Бажева Р.Ч. Полиэфирэфиркетоны: синтез, свойства, применение (обзор) // Пластические массы. 2018. № 7–8. С. 15–23. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-7-8-15-23.
13. May R. Polyetheretherketones // Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Wiley, 2008. P. 1–9. DOI: 10.1002/0471440264.pst266.
14. Способ получения полиэфирэфиркетона: пат. 2673242 Рос. Федерация; заявл. 27.06.18; опубл. 23.11.18.
15. Колпачков Е.Д., Петрова А.П., Курносков А.О., Соколов И.И. Методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 11 (83). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.
16. Иллиг А., Швацман П. Термоформование: практическое руководство. СПб.: Профессия, 2007. 288 с.
17. Wilkinson S.L. Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites. University of Bristol, 2021. 167 p.
18. De Almeida O., Bessard E., Bernhart G. Influence of processing parameters and semi-finished product on consolidation of carbon/PEEK laminates // 15th European Conference on Composite Materials. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287042143> (дата обращения: 13.09.2024).
19. Павлюкович Н.Г., Иванов М.С., Морозова В.С., Донских И.Н. Исследование термостабильности расплава полиэфирэфиркетона марки ПЭЭК-50П и углепластика на его основе // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-90-98.

20. Vasconcelos G.C., Mazur R.L., Ribeiro B., Botehlo E. Evaluation of Decomposition Kinetics of Poly (Ether-Ether-Ketone) by Thermogravimetric Analysis // *Materials Research*. 2014. Vol. 17 (1). P. 227–235.
21. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.

References

1. 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: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
2. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
3. 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: 13.09.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Gunyaev G.M., Kablov E.N. Structural carbon fiber reinforced plastics at the turn of the century. *Aviation materials. Selected works of «VIAM» 1932–2002*. Moscow: VIAM, 2002, pp. 242–247.
5. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia: collection of scientific and information materials*. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
6. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing – the basis of innovations. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
7. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
8. Ivanov M.S., Sorokin A.E. Sheet thermoplastic carbon fiber based on polyetheretherketone for the manufacture of aircraft engine nacelle parts by thermoforming. *Proc. V All-Rus. scientific-technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, art. 03.
9. Beev A.A., Khashirova S.Yu., Beeva D.A., Shokumova M.U. Powdered aromatic polyetheretherketones and copolyetheretherketones. *Plasticheskie massy*, 2022, no. 7–8, pp. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-7-8-6-9.
10. Mikitaev A.K., Salamov A.Kh., Beev A.A., Beeva D.A. Filling of polyetheretherketones (PEEK) as a method for producing composites with high performance properties. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 5–6, pp. 6–9. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-5-6-6-9.
11. Lyashenko E.Yu., Yakovleva K.A., Andreeva T.I. et al. Composite materials based on polyetheretherketone. *Plasticheskie massy*, 2023, no. 1–2, pp. 11–13. DOI: 10.35164/0554-2901-2023-1-2-11-13.
12. Kharaev A.M., Bazheva R.Ch. Polyetheretherketones: synthesis, properties, application (review). *Plasticheskie massy*, 2018, no. 7–8, pp. 15–23. DOI: 10.35164/0554-2901-2018-7-8-15-23.
13. May R. Polyetheretherketones. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Wiley, 2008, pp. 1–9. DOI: 10.1002/0471440264.pst266.
14. *Method for producing polyetheretherketone*: pat. 2673242 Rus. Federation; appl. 27.06.18; publ. 23.11.18.
15. Kolpachkov E.D., Petrova A.P., Kurnosov A.O., Sokolov I.I. Methods of molding aviation products from PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36.

16. Illig A., Shvatsman P. *Thermoforming: A Practical Guide*. St. Petersburg: Profession, 2007, 288 p.
17. Wilkinson S.L. *Optimisation of the stamp forming process for thermoplastic composites*. University of Bristol, 2021, 167 p.
18. De Almeida O., Bessard E., Bernhart G. Influence of processing parameters and semi-finished product on consolidation of carbon/PEEK laminates. *15th European Conference on Composite Materials*. 2012. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287042143> (accessed: September 13, 2024).
19. Pavlukovich N.G., Ivanov M.S., Morozova V.S., Donskih I.N. Investigation of the thermal stability of the melt polyetheretherketone PEEK-50P and carbon fiber based on it. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-90-98.
20. Vasconcelos G.C., Mazur R.L., Ribeiro B., Botehlo E. Evaluation of Decomposition Kinetics of Poly (Ether-Ether-Ketone) by Thermogravimetric Analysis. *Materials Research*, 2014, vol. 17 (1), pp. 227–235.
21. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.

Информация об авторах

Иванов Михаил Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Морозова Вероника Сергеевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Павлюкович Надежда Геннадьевна, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail S. Ivanov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Veronika S. Morozova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nadezhda G. Pavlukovich, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.10.2024.
The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 24.10.2024.

Научная статья

УДК 666.3

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88

**ПРЕДКЕРАМИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
ПУТЕМ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ В ВАННЕ
Часть 1. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА**

А.В. Бутузов¹, А.В. Семина¹

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

Аннотация. В первой части обзора рассмотрены основные типы предкерамических кремнийорганических полимеров и типы образующихся в ходе их пиролиза керамических материалов. Проведен анализ научно-технических литературных и патентных источников информации по методам синтеза, химической модификации, физико-химическим свойствам, основным производителям и областям применения кремнийорганических полимеров. Описаны основные структурные факторы предкерамических полимеров, позволяющие варьировать в большом диапазоне весь комплекс физико-химических свойств керамического материала.

Ключевые слова: предкерамические полимеры, фотополимеризация в ванне, полиорганосилоксаны, полиорганосилилкарбодиимиды, полиорганокاربосиланы, полиорганосилазаны, керамика на основе полимерных прекурсоров

Для цитирования: Бутузов А.В., Семина А.В. Предкерамические полимеры для производства керамических изделий путем фотополимеризации в ванне. Часть 1. Способы получения и свойства // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.

Scientific article

**PRECERAMIC POLYMERS
FOR THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS
BY VAT PHOTOPOLYMERIZATION
Part 1. METHODS OF PRODUCTION AND PROPERTIES**

A.V. Butuzov¹, A.V. Semina¹

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 first part of the review considers the main types of preceramic organosilicon polymers and the types of their polymer derived ceramics formed during pyrolysis. An analysis of scientific-technical literature and patent sources of information on methods of synthesis, chemical modification, physico-chemical properties, main manufacturers and areas of application of organosilicon polymers is carried out. The main structural factors of preceramic polymers are described, which make it possible to vary the entire complex of physico-chemical properties of a ceramic material in a wide range.

Keywords: preceramic polymers, vat photopolymerization, polyorganosiloxanes, polyorganosilylcarbodiimides, polyorganocarbosilanes, polyorganosilazanes, polymer derived ceramics

For citation: Butuzov A.V., Semina A.V. Preceramic polymers for the production of ceramic products by vat photopolymerization. Part 1. Methods of production and properties. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-70-88.

Введение

В современном мире керамические материалы приобрели широкое распространение в самых разных областях промышленности, особенно в конструкциях авиационно-космической техники, вследствие высоких термической стойкости и устойчивости к влиянию агрессивных сред, а также превосходным прочностным и электрофизическим свойствам [1, 2]. В настоящее время существует много методов изготовления керамических изделий – например, таких, как литье под давлением, прессование, экструзия и другие. Несмотря на эффективность этих способов, производство конструкций сложной геометрической формы из керамических материалов осложняется необходимостью в дорогостоящих и трудоемких процессах изготовления литьевых форм с заданными геометрическими размерами и необходимой механической обработкой. При этом жесткая механическая обработка может привести к снижению качества изготавливаемого изделия, так как при проведении работ могут появляться сколы или трещины, что обусловлено высокой хрупкостью и низкой трещиностойкостью керамических материалов [3].

В связи с этим внимание исследователей сместилось от традиционных методов получения керамических изделий к использованию методов аддитивного производства [4–6]. Наиболее многообещающим из них является метод фотополимеризации в ванне, который позволяет изготавливать керамические изделия сложной конфигурации с высоким разрешением, а также дает возможность получать совсем небольшие изделия [4]. Кроме того, это один из немногих процессов аддитивного производства, который позволяет производить высокоэффективную керамику, детали с относительной плотностью >99 % [7] и свойствами, сравнимыми со свойствами деталей, полученных традиционными методами [8].

Для получения керамических изделий путем фотополимеризации в ванне обычно используют суспензии или пасты с высоким содержанием керамических частиц (>40 % (объемн.)) [9, 10]. Однако применение данных высоконаполненных керамических суспензий в этом процессе связано с рядом сложностей и недостатков. Так, увеличение количества керамического наполнителя в суспензии приводит к снижению ее текучести, что в свою очередь существенно затрудняет процесс формирования тонкого слоя для проведения фотоотверждения [9]. В то же время размер и форма керамических частиц, а также неоднородность самой суспензии могут существенно ограничивать ее пригодность для изготовления структур с гораздо меньшими размерами элементов, т. е. разрешением печати. Кроме того, значительные отличия в значениях показателей преломления керамического наполнителя и фотоотверждаемой среды приводят к существенному уменьшению глубины отверждения. Данные, а также другие [9–11] технические сложности и недостатки непосредственно связаны с применением керамических частиц в качестве наполнителя в фотоотверждаемых суспензиях. Для решения вышеуказанных проблем многие авторы [9, 11] предлагают использовать в составах фотополимеризуемых композиций жидкие предкерамические полимеры.

В настоящее время исследования 3D-печати с использованием предкерамических полимеров на основе процессов аддитивного производства керамики все еще находятся на начальной стадии изучения [9]. Однако, как можно видеть из данных статистического исследования количества общемировых публикаций, проведенного на основе литературных научно-технических источников мультидисциплинарной платформы Sciencedirect компании Elsevier, интерес исследователей к методам

фотополимеризации в ванне с получением керамики на основе предкерамических полимеров за последние 10 лет (2014–2024 гг.) значительно возрос, что подтверждается увеличением количества публикаций в 10 раз со следующими ключевыми маркерами: фотополимеризация в ванне (VP), стереолитография (SLA), цифровая обработка светом (DLP), двухфотонная полимеризация (TPP) – для керамики из предкерамических полимеров (рис. 1).

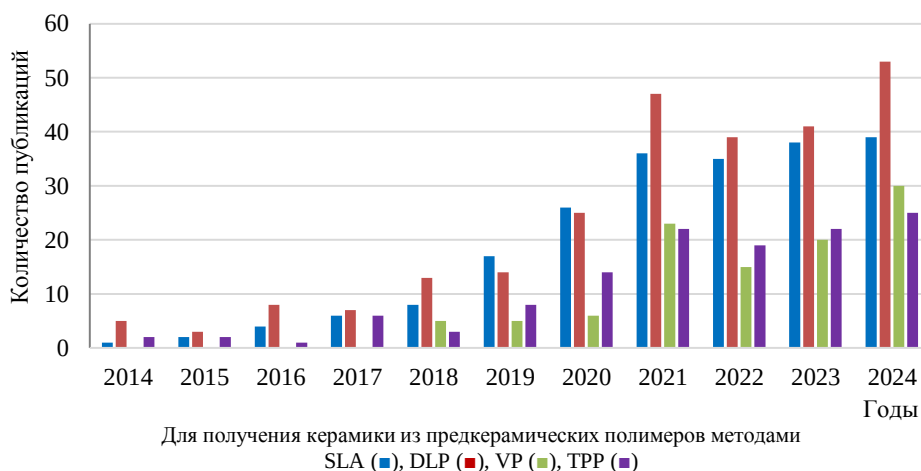


Рис. 1. Распределение научно-технических публикаций с 2014 по 2024 г. по сведениям портала Sciencedirect

В первой части данного обзора подробно рассмотрена информация о наиболее важных типах предкерамических полимеров, применяемых для изготовления керамических материалов на основе полимерных прекурсоров. Описаны распространенные способы синтеза и сферы использования кремнийорганических соединений. Освещены особо значимые структурные факторы, оказывающие влияние на физико-химические свойства получаемой керамики.

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

Предкерамические полимеры

Первая работа, посвященная получению керамики из предкерамических полимеров, опубликована еще в 1960 г. [12]. Спустя чуть более десяти лет другими авторами представлены результаты работ по получению $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ и SiC керамических волокон, полученных в результате пиролиза кремнийорганических полимеров и готовых к применению при высоких температурах [13, 14]. С тех пор предкерамические полимеры повсеместно широко используются для получения современных керамических материалов не только бинарного (Si_3N_4 , SiC , SiO_2), но и трех-, четырехкомпонентного (SiOC , SiCN , SiBOC , SiBCN , SiAlOC , SiAlCN и др.) составов. Благодаря своим физическим и химическим свойствам предкерамические полимеры стали применяться в нескольких ключевых областях [11], таких как авиация, транспорт, оборона, энергетика, медицина и другие.

В основном в качестве предкерамических полимеров используются кремнийорганические соединения. Основные типы данного класса соединений, а также образующиеся в результате их пиролиза и кристаллизации керамические материалы представлены схемой на рис. 2. В качестве R_1 , R_2 , R_3 , R_4 в химических формулах кремнийорганических соединений могут присутствовать различные органические заместители или

функциональные группы, от типа которых будут зависеть физико-химические свойства полимеров [15], такие как растворимость, термостойкость, реология, устойчивость к воздействию окружающей среды и другие. В зависимости от типа данных заместителей и функциональных групп также будет определяться такая важная характеристика керамического материала, как наличие свободного углерода в составе основной фазы. Несколькими авторами [16, 17] выдвинуто предположение, что содержание избыточного количества углерода отрицательно сказывается на прочностных свойствах керамического материала и его термоустойчивости, в особенности на стабильности к окислению и кристаллизации. Тем не менее в последнее время установлено [18], что при специальных условиях высокое наличие углерода в керамических материалах SiOC и SiCN позволяет повысить стойкость керамики к процессам деструкции и кристаллизации.

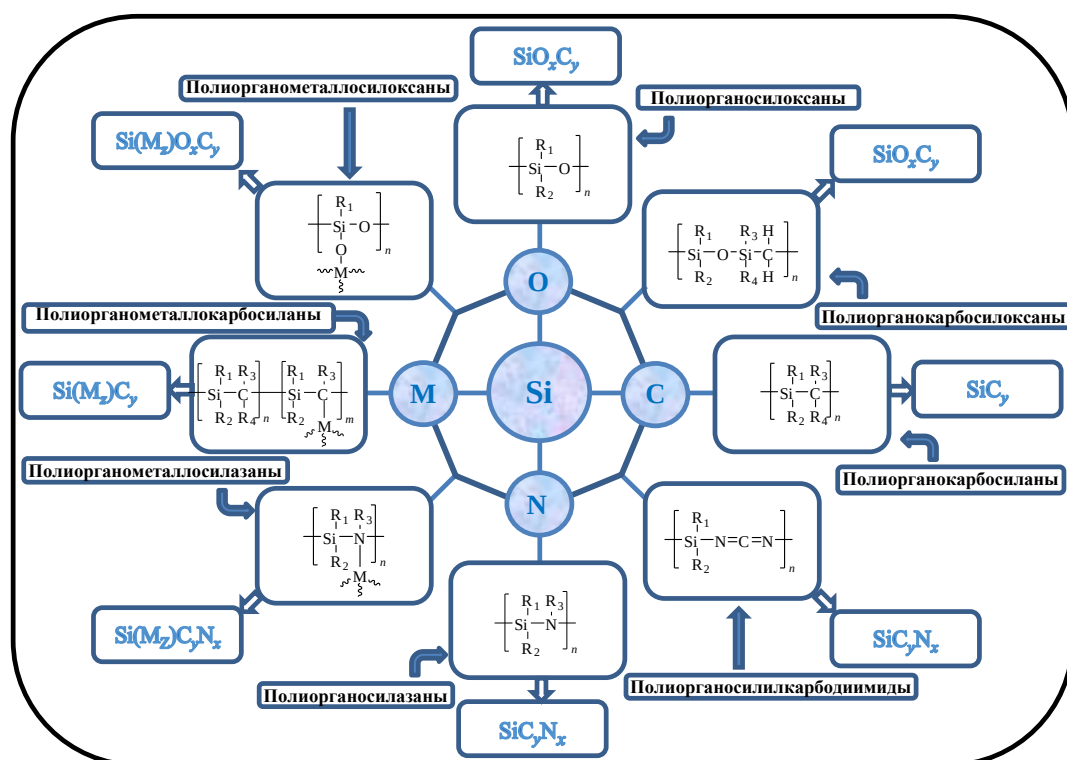


Рис. 2. Схема основных предкерамических полимеров и формирующихся на их основе керамических материалов (M: B, Mo, Zr, Hf, Ti, Al и др.)

Важное значение для проведения эффективного преобразования кремнийорганических соединений в готовую керамику имеют их термостойкость, растворимость, а также реологические свойства расплавов и растворов, зависящие от температуры. Благодаря тому, что кремнийорганические высокомолекулярные соединения в большинстве случаев являются жидкими или твердыми смолами, которые с легкостью способны смешиваться в широком диапазоне концентраций с различными типами растворителей и фоточувствительных мономеров, многими авторами отмечена перспективность их применения в качестве исходных компонентов для переработки в керамические материалы путем фотополимеризации в ванне [9, 11].

Следует отметить, что такие характеристики, как микроструктура, состав, фазовое распределение и количество фаз керамического материала, в значительной степени зависят от молекулярной структуры и типа предкерамических соединений [18]. Таким образом, путем подбора требуемого состава и молекулярной структуры предкерамического полимера можно варьировать в большом диапазоне полный комплекс химических и физических

свойств керамического материала. В связи с этим синтез кремнийорганических предкерамических полимеров является первой из ключевых задач при исследовательских разработках керамических материалов из предкерамических полимерных прекурсоров.

Особо важным фактором для керамообразующих полимеров-прекурсоров является природа функциональной группы, которая определяет способность любых предкерамических полимеров к фотополимеризации. Наиболее часто используемые для фотополимеризации в ванне кремнийорганические соединения имеют такие фотореактивные функциональные группы, как винильная, аллильная, акрилатная, метакрилатная, эпоксидная и др. Более подробное описание механизмов фотополимеризации, способов синтеза фотоотверждаемых предкерамических полимеров, модификации коммерческих кремнийорганических полимеров с целью прививки фотореактивных функциональных групп и способов получения фотоотверждаемых полимерных композиций будет представлено во второй части обзора.

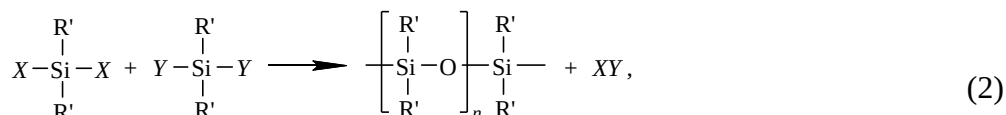
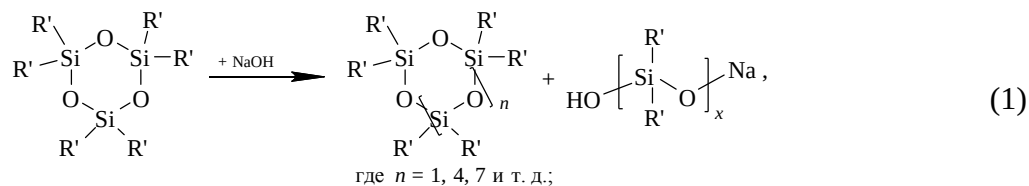
Полиорганосилоксаны

Полиорганосилоксаны – это гетероцепные высокомолекулярные соединения, главные цепи макромолекул которых состоят из чередующихся группировок атомов кислорода и кремния (силоксановой связи Si–O–Si) с органическими радикалами или функциональными группами у атома кремния (–R) [19]. Номенклатура предложенных на рынке полиорганосилоксанов достаточно широкая, что обусловлено их низкой стоимостью, а также комплексом высоких химических, теплофизических и диэлектрических свойств. Изменение структуры силоксанового каркаса, строения органических заместителей, а также природы концевых функциональных групп предоставляет возможность получения полиорганосилоксанов с необходимыми особенностями свойств, что позволяет удовлетворять сложные требования различных отраслей техники [20]. Так, полиорганосилоксаны часто применяются в качестве гидрофобизирующих жидкостей, масел, лаков, герметиков, резин, высокотемпературных клеев, связующих для полимерных композиционных материалов на основе стеклотканей, а также предкерамических полимеров в таких отраслях, как самолетостроение, авиакосмическая техника, приборостроение, медицина и т. д. [20–22]. Наиболее известными производителями полиорганосилоксанов являются АО «ГНИИХТЭОС» (Россия), ООО «Химпродукт» (Россия) и иностранные организации Momentive Performance Products (США), Gelest (США), Kaneka Corp. (Япония), Shin-Etsu Chemical Co Ltd (Япония), Dow Corning Corp. (США), Wacker Chemie AG (Германия), Elkem Silicones (Норвегия) и другие. [23].

Существует множество разнообразных методов синтеза полиорганосилоксанов (рис. 3) – например, таких, как полимеризация органоциклосилоксанов (1) [24], гетерофункциональная конденсация функциональных силанов (2) [19], ацидогидролитическая поликонденсация (3) [25], взаимодействие органохлорсиланов с диметилсульфоксидом (ДМСО) (4) [19] и другие.

Однако основным и наиболее изученным методом получения полиорганосилоксанов является гидролитическая поликонденсация (ГПК) органо(хлор-, ацилокси-, алкокси-)силанов [19, 20, 26, 27]. Гидролитическая поликонденсация функциональных органосиланов относится к классу поликонденсационных процессов, в которых образование реакционных центров происходит *in situ*. Общеизвестно, что такие типы мономеров, как органохлорсиланы, органоацилоксисиланы, органоалкоксисиланы представляют собой химические соединения со скрытой функциональностью, гидролиз функциональных групп которых приводит к образованию молекул, имеющих два типа реакционных центров –Y (–Cl, –OCOR', –OR') и –OH ((5) и (6)). Вследствие взаимодействия этих реакционных центров происходит образование силоксановой связи по следующим направлениям (рис. 4): путем гомофункциональной (8)–(10) и гетерофункциональной конденсации (7) и (13)–(15) продуктов гидролиза $R_pSiY_{4-p-k}(OH)_k$ [20]. При этом также

возможно прохождение обменных реакций (11), (12) и (16) между гидроксид- и Y-содержащими интермедиатами, а также реакции внутримолекулярной гетеро- и гомофункциональной конденсации (циклизации) ((17) и (18)).



где X, Y – разные по типу группы из ряда –Hal, –OCOR, –ONa, –OH, –OR, –H, –NH₂;

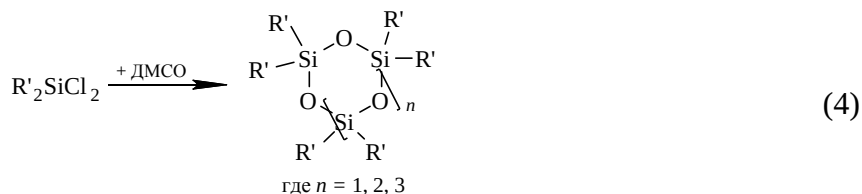
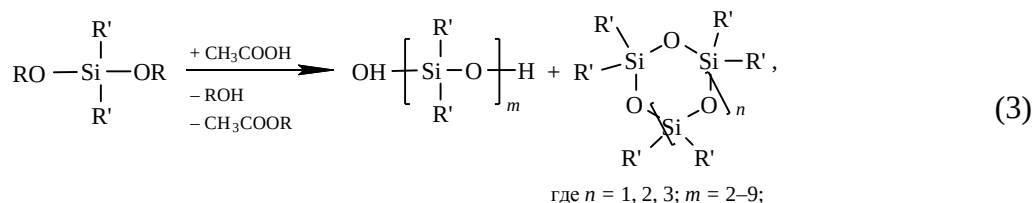


Рис. 3. Схемы синтеза полиорганосилоксанов

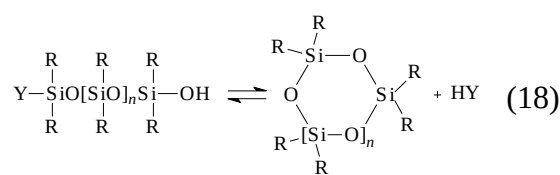
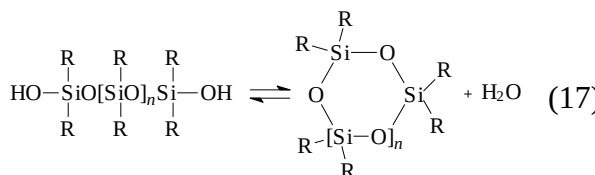
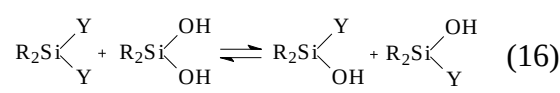
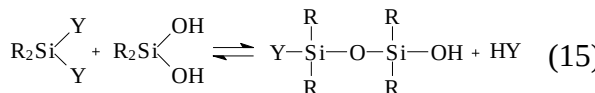
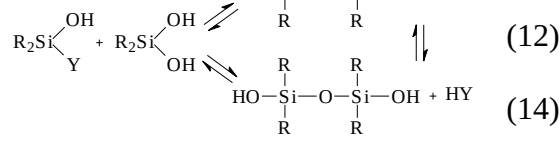
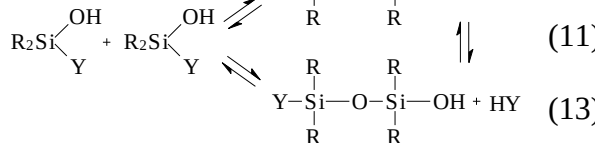
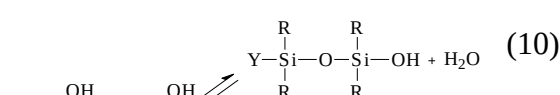
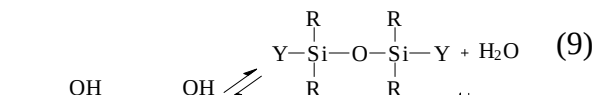
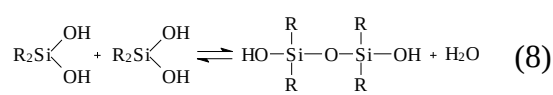
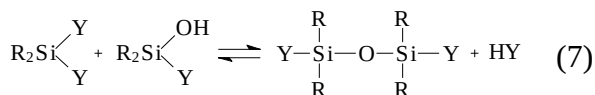
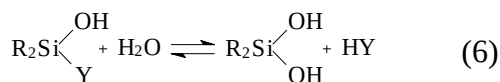
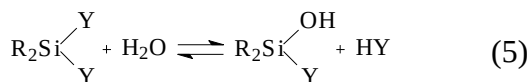
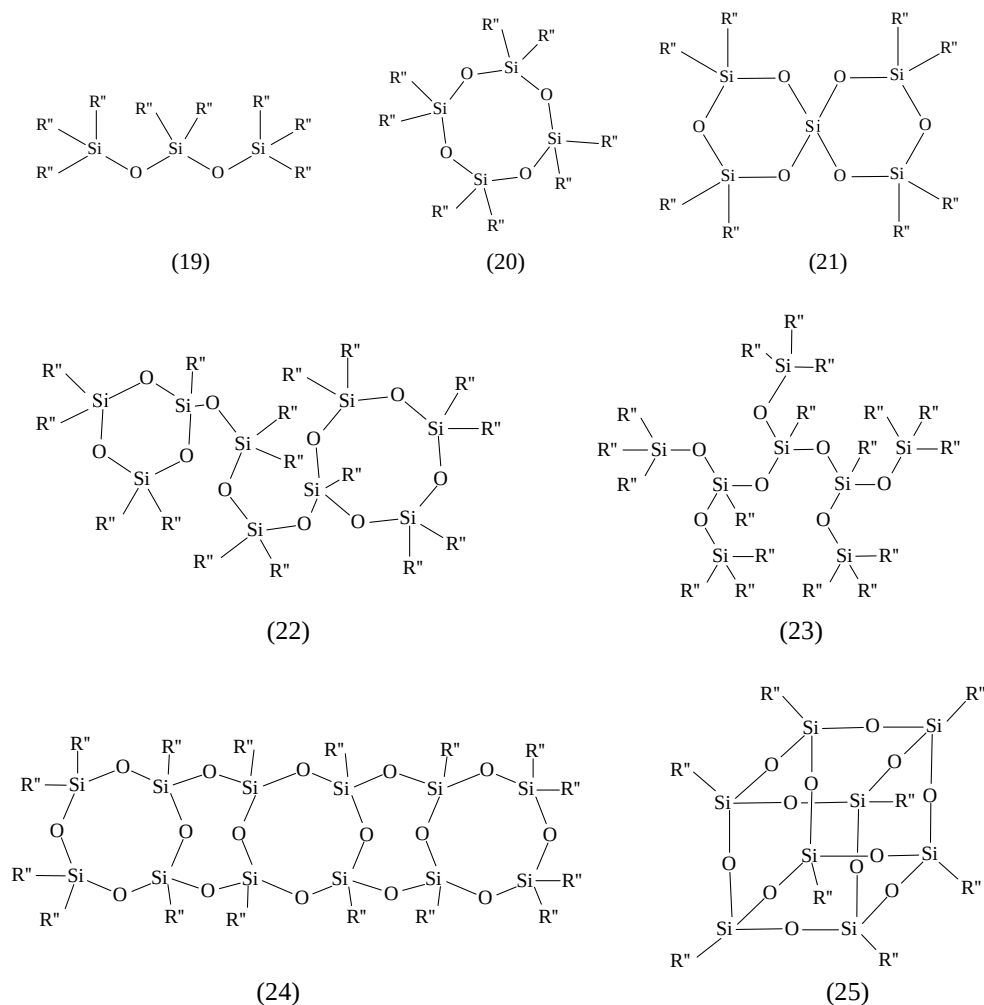


Рис. 4. Схема основных реакций гидролитической поликонденсации функциональных органосилоксанов

Следует отметить, что в случае проведения ГПК органоалкоксисиланов для прохождения реакций гидролиза и поликонденсации требуется дополнительное введение катализатора, концентрация и тип которого будут существенным образом влиять на длительность проведения процесса и конечный состав продуктов реакций. В случае же использования органохлорсиланов или органоацилоксисиланов для проведения ГПК дополнительное введение катализатора не требуется благодаря их высокой реакционной способности, а также выделяющимся в результате химических реакций кислотам, которые выступают в качестве катализатора [24].

Структура полученных полиорганосилоксанов, в зависимости от методов, условий синтеза, функциональности исходных мономеров, а также их реакционной способности, может быть разной (рис. 5): линейной (19), циклической (20), спироциклической (21), циклолинейной (22), разветвленной (23), лестничной (24), полиэдрической (25) либо сочетанием тех и других структур [28].



где R'': -H, -CH₃, -C₂H₅, -C₃H₇, -C₆H₅, -Cl, -OCOCH₃, -OCH₃, -OH и др.

Рис. 5. Структуры полиорганосилоксанов

Полиорганосилоксаны, полученные путем ГПК смесей мономеров, имеющих среднюю функциональность >2, представляют собой сложные, трехмерные макромолекулы со значительной долей циклических и сильно разветвленных циклических фрагментов. Для более удобного описания таких полиорганосилоксанов обычно используют обозначения (рис. 6), принятые впервые в компании General Electric [29].

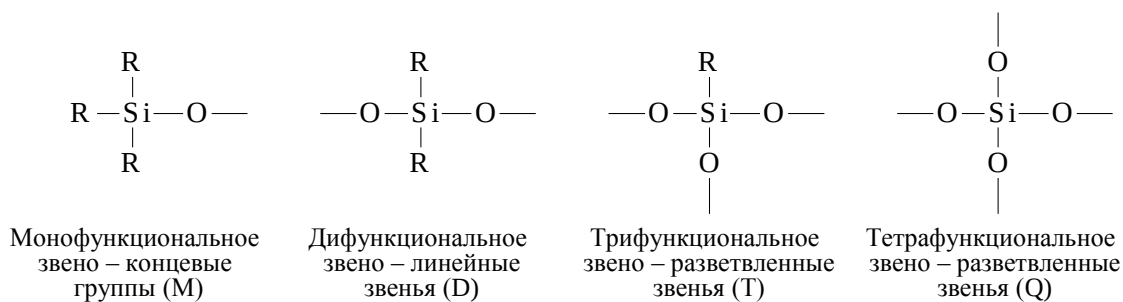


Рис. 6. Основные обозначения полиорганосилоксановых структурных звеньев

Важными структурными факторами, оказывающими влияние на свойства полиорганосилоксанов [23] и произведенной в результате их пиролиза керамики SiOC, являются: соотношение органических заместителей к атомам кремния (R/Si), тип органических заместителей у атома кремния (R), молекулярная масса, а также наличие и природа функциональных групп полиорганосилоксана.

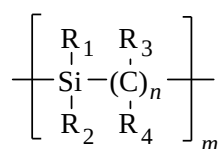
Общеизвестно, что более сшитые структуры полиорганосилоксанов позволяют получать керамические материалы SiOC с более высоким выходом керамики [30]. Снижение соотношения R/Si в синтезируемом полиорганосилоксане (при условии высокой конверсии по функциональным группам) приводит к увеличению числа связей $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$ в молекулах, что характеризует их структуру, как более сшитую. Однако с увеличением количества таких сшивок меняется молекулярная масса, структура и особенно реологические свойства полимера (от вязких жидкостей – к твердым смолам), что более важно для аддитивного производства. Как правило, наиболее выпускаемые промышленностью кремнийорганические смолы характеризуются соотношением R/Si, равным от 1,0 до 1,7 [28]. Тип органических радикалов у атома кремния в первую очередь будет определять такую важную характеристику керамического материала, как наличие свободного углерода в составе основной фазы. Таким образом, в зависимости от условий проведения пиролиза, увеличение размера органического радикала у атома кремния будет обуславливать снижение выхода керамического пиролитического остатка и увеличение количества свободного углерода.

Гидролитическая поликонденсация орстаноалкоксисиланов с алкоксидами других металлов позволяет вводить дополнительные элементы (Al, B, Zr, Ti) в структуру полиорганосилоксанов [31]. Данный метод позволяет синтезировать или модифицировать кремнийорганический полимер для изготовления керамики со структурными фазами, такими как SiCNO, SiBCN, SiBCO, SiAlCN и SiAlCO.

Полиорганокарбосиланы

Полиорганокарбосиланы – это гетероцепные высокомолекулярные соединения, главные цепи макромолекул которых состоят из чередующихся $\equiv\text{Si}-\text{C}\equiv$ звеньев. Как правило, учеными приводится их упрощенная обобщенная структурная формула (рис. 7), но в действительности полиорганокарбосиланы характеризуются сложной структурой, состоящей из линейных, высокоразветвленных, полициклических и других участков, а также имеющей в своей основной цепи, наряду со звеньями Si–C, звенья Si–Si [15, 18, 32].

Типичная структура полиорганокарбосилана со значительно разветвленными линейно-циклическими молекулами с большим количеством перекрестных связей и активных боковых звеньев представлена на рис. 8.



где R_1, R_2, R_3, R_4 : $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-\text{C}_3\text{H}_7$, $-\text{C}_4\text{H}_9$, $-\text{C}_6\text{H}_5$, $-\text{H}$ и другие;
 $(C)_n$: $(-\text{CH}_2-)$, $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, $(-\text{CH}_2-)_n$ (где $n > 3$), $-\text{CH}=\text{CH}-$,
 арилены, ксилилены и другие

Рис. 7. Общая структурная формула полиорганокарбосилана

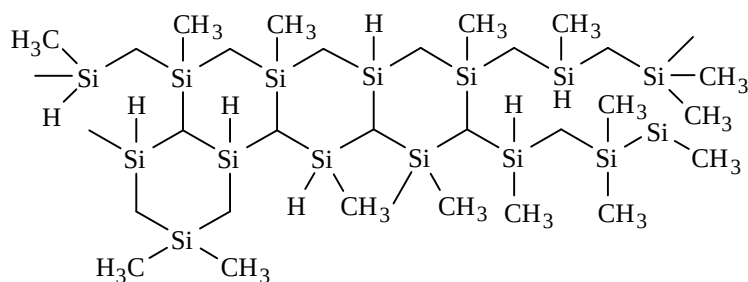
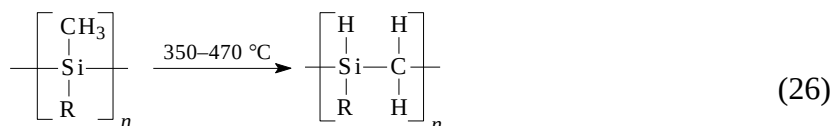


Рис. 8. Структура полиорганокарбосилана

В качестве основных методов их синтеза можно выделить (рис. 9): термическое разложение с последующей перегруппировкой полиорганосиланов при температурах 350–470 °С при повышенном или атмосферном давлении (26) [33, 34], полимеризация циклических карбосиланов (27) [18], гидросилилирование органосиланов (28) [15] и другие.



линейные и/или циклические

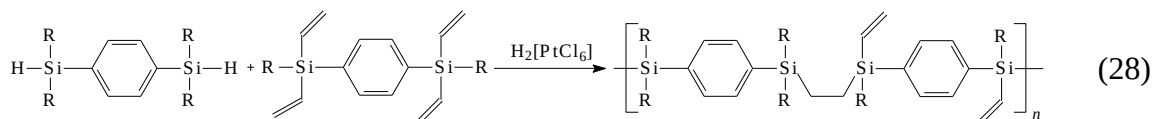
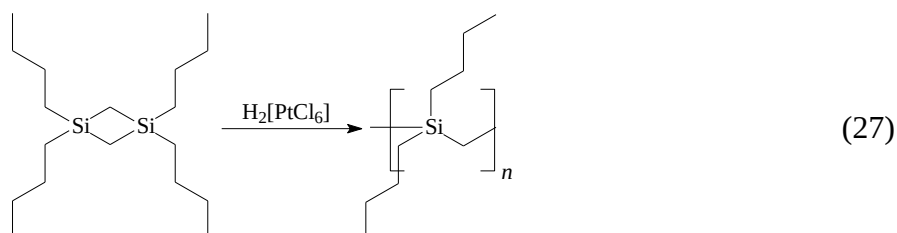


Рис. 9. Методы получения полиорганокарбосиланов

В настоящее время полиорганокарбосиланы широко применяются для производства электро- и фотопроводников, фоторезисторов, нелинейных оптических материалов, а также для прекерамических прекурсоров при получении SiC-волокон, порошков, усов, композитов и наноматериалов [35, 36]. Наибольшее распространение среди поликарбосиланов нашли полисилметилены [32], в которых в качестве мостиков присутствуют метиленовые группы. При их термическом разложении происходит образование

состава SiC-керамики, наиболее близкого к стехиометрическому. При этом боковые метильные заместители предоставляют избыточный углерод, больше половины которого удаляется при термическом разложении и не входит в состав конечного керамического материала.

При разработке новых типов поликарбосиланов, предназначенных для высокотемпературных композиционных материалов, предложено модифицировать поликарбосилановую матрицу путем введения в нее различных элементов. Так, с конца 1990-х гг. проводились исследования [32, 37–39] с целью изготовления бескислородных кремнийорганических олигомеров, содержащих наночастицы соединений тугоплавких металлов (Al, Hf, Mo, Zr, Ti). Обнаружено, что при пиролизе металлополикарбосиланов эти металлы превращаются в наноразмерные частицы силицидов, нитридов и карбидов, которые оказывают стабилизирующее действие на структуру керамического материала, удерживая ее на наноразмерном уровне вплоть до температур 1600–1700 °С.

Полиорганосилазаны

Полиорганосилазаны – это гетероцепные высокомолекулярные соединения, главные цепи макромолекул которых состоят из повторяющихся группировок атомов кремния и азота (силазановой связи $\equiv\text{Si}-\text{N}-\text{Si}\equiv$), при этом у атома кремния в качестве заместителей, как правило, имеются органические радикалы, а атом азота имеет чаще всего атом водорода или также органический радикал [24]. В последнее время описаны многие полиорганосилазаны различной структуры, преимущественно содержащие в полимерных цепях циклические фрагменты, некоторые из них производятся в промышленном и опытно-промышленном масштабе и находят практическое применение благодаря комплексу ценных свойств [40]. Полиорганосилазаны – это превосходные пленкообразующие соединения, необходимые для создания защитных покрытий, за счет своей высокой стойкости к окислению и коррозии, высокой твердости, гидрофильности, теплостойкости, прозрачности и устойчивости к ультрафиолетовому излучению, а также устойчивости к атмосферным воздействиям. Благодаря высокой степени адгезии к широкому спектру различных материалов (таких как металлы, графит, стекло, древесина, композиционные и керамические материалы) они успешно применяются в качестве прозрачных термостойких, антипригарных, антинакипных, защитных/антикоррозионных, антивандальных (антиграфити), антибликовых, автомобильных покрытий и прочих. Полиорганосилазаны также широко внедряются в промышленность в качестве связующих для изготовления полимерных композиционных материалов, отверждающих добавок для эпоксидных и эпоксидно-кремнийорганических олигомеров, высокотермостойких клеев, модификаторов кабельных резин, гидрофобизирующих жидкостей, а также предкерамических полимеров для получения высокотемпературостойких керамических материалов из карбонитрида кремния и др. [15, 18, 41]. Наиболее всемирно известными разработчиками и изготовителями полиорганосилазанов являются АО «ГНИИХТЭОС» (Россия) и иностранные организации Merck KGaA (Германия), Kion Corp. (США), IOTA Silicone Oil Co Ltd (Китай), Clariant (Швейцария), DNF Co Ltd (Корея) и другие, в производственный ассортимент которых входят полиорганосилазаны таких марок, как «Полисил-01», «Полисил-04», «Гидросил-01», Durazane 2200, Durazane 1066, Polysilazane HTT 1800, DFC-02A, DHC-18A, Ceraset Polysilazane 20, Organic Polysilazane IOTA 9150A, Organic Polyborosilazane IOTA 9120 и др.

Один из основных методов синтеза полиорганосилазанов основан на прохождении реакций аммонолиза или аминолиза органохлорсиланов (29) – впервые предложен авторами работы [42] в 1964 г. Однако при проведении процесса в основном образуются

низкомолекулярные органоаминосиланы и олигоорганосилазаны, которые являются достаточно летучими соединениями, что мешает использовать их в качестве предкерамических полимеров [18, 24]. Поэтому эти соединения используются в качестве мономеров, из которых могут получаться соответствующие высокомолекулярные полиорганосилазаны на основе реакций каталитической поликонденсации олигоорганосилазанов (29) и термической конденсации органоаминосиланов (30), представленных на рис. 10. Следует отметить, что при синтезе линейных полиорганосилазанов возникает ряд трудностей в связи с тем, что у этого класса соединений повышенная (по сравнению с такими соединениями, как полиорганосилоксаны) склонность к циклизации [24].

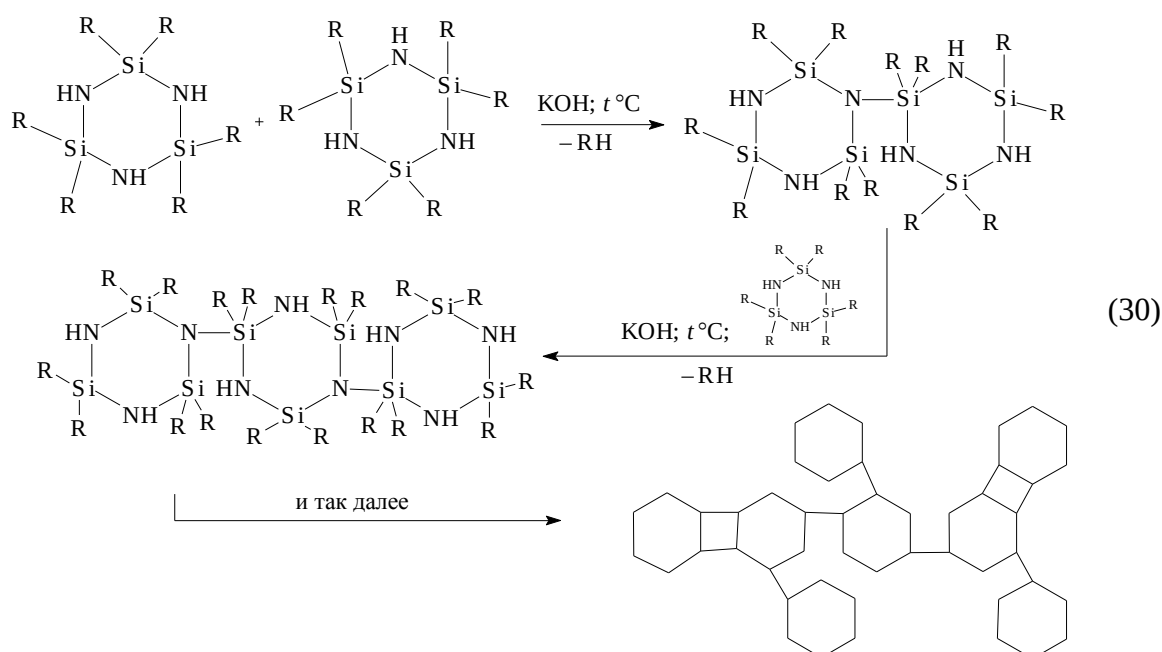
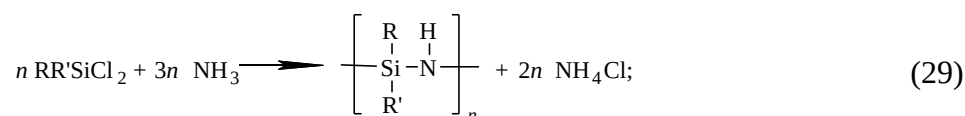


Рис. 10. Способы получения полиорганосилазанов

Термическая конденсация органоаминосиланов (31), содержащих три или более аминогрупп, сопровождается активной циклизацией и приводит к образованию термо-реактивных полимеров, способных отверждаться при нагревании, и циклических продуктов пространственной структуры (рис. 11).

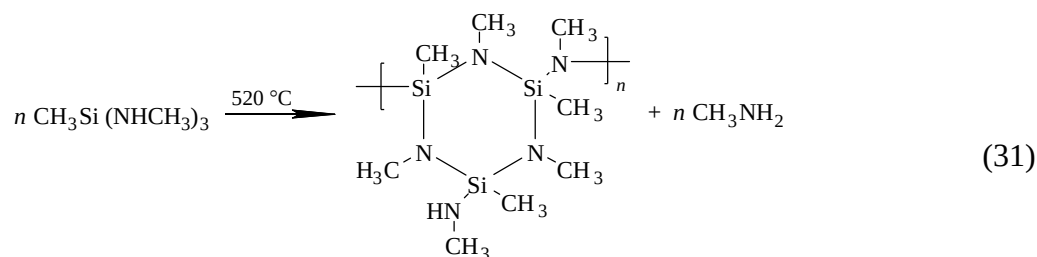
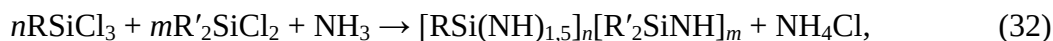


Рис. 11. Схема синтеза полиорганосилазана путем термической конденсации органоаминосиланов

Реакция термической конденсации органоаминосиланов имеет место при получении полиорганосилазановых высокомолекулярных соединений на основе органохлорсиланов с функциональностью >2 . Например, для получения полиорганосилазанового лака осуществляют реакцию соаммонолиза ди- и трифункциональных органохлорсиланов (32) в органическом растворителе с последующей термической конденсацией продуктов соаммонолиза в процессе концентрирования раствора при отгонке растворителя (рис. 12). Полученный в ходе синтеза полимер имеет разветвленную структуру, содержащую значительное количество шести- и восьмичленных циклических фрагментов.



где R: $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-\text{C}_6\text{H}_5$; R': $-\text{CH}_3$

Рис. 12. Схема синтеза полиорганосилазана путем соаммонолиза ди- и трифункционального органохлорсиланов

Общеизвестно, что высокий выход SiCN-керамических материалов на основе полимерных прекурсоров обуславливается большими значениями молекулярной массы полиорганосилазанов [18]. Поэтому с целью получения высокомолекулярных полиорганосилазанов с высокой сшивкой макромолекул полимера предложены несколько методов их получения. Одна из таких методик получения (рис. 13), представленная авторами работы [43] в 1997 г., заключалась в применении гидрида калия в качестве катализатора основного типа для проведения реакции дегидрирования между $\equiv\text{Si}-\text{H}$ и $=\text{N}-\text{H}$ (33).

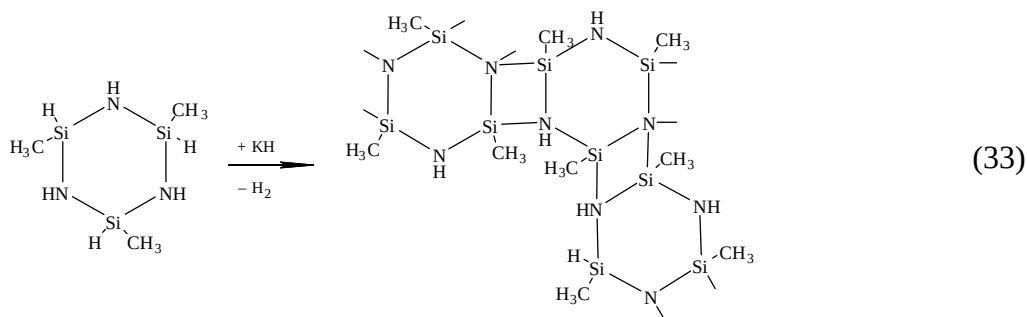


Рис. 13. Схема синтеза полиорганосилазана путем реакций дегидрирования органоцикло-силана

Большой интерес вызывают полиорганосилазаны, у которых в главной цепи имеются атомы других элементов, поскольку комплекс свойств полученных на их основе керамических материалов весьма существенно превосходит свойства нитридной и карбидной керамик, полученных на основе предкерамических полимеров, не содержащих в своей структуре металлов [44]. Так, авторами работы [45] изучен процесс пиролиза синтезированных полиорганометаллосилазанов, содержащих атомы Ti и Zr. Обнаружено, что атомы титана в составе полиорганосилазановой цепи порождают ускорение процесса термодеструкции, а также содействуют более полному удалению углерода и водорода. При наличии атомов циркония в предкерамическом полимерном прекурсор при термодеструкции совместно с оксидизацией и нитридизацией происходят процессы карбидизации.

Полиорганосилилкарбодиимиды

Полиорганосилилкарбодиимиды – это гетероцепные высокомолекулярные соединения, главные цепи макромолекул которых состоят из повторяющихся звеньев $-\text{Si}-\text{N}=\text{C}=\text{N}-$. По сравнению с полиорганосилазанами они представляют собой класс более термоустойчивых кремнийорганических соединений, из которых можно изготавливать трехкомпонентные керамические составы SiCN [15, 18]. Благодаря строению основной цепи полиорганосилилкарбодиимидов соотношение N/Si в их молекулах приближено к 2, что позволяет изготавливать обогащенные азотом керамические материалы в результате процесса пиролиза как в среде аммиака, так и в инертной атмосфере. С самыми первыми работами (с начала 1960-х гг.), посвященными получению силилкарбодиимидов, можно подробно ознакомиться в обзорной статье [46].

В настоящее время многие исследования [47–49] показали, что для проведения синтеза полиорганосилилкарбодиимидов (рис. 14) в качестве наиболее подходящего исходного сырья выступает N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимид. Его синтез обычно осуществляется по реакции взаимодействия гексаметилдисилазана с цианогуанидином (34).

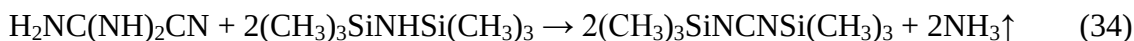
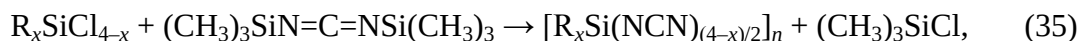


Рис. 14. Схема синтеза N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимида

Полиорганосилилкарбодиимиды синтезируют по реакции поликонденсации ор-ганохлорсиланов с N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимидом (35) при температурах 20–230 °C (рис. 15) [47–49]. При этом установлено, что поликонденсацию нельзя проводить очень быстро, особенно на начальных стадиях, а следует достаточно медленно осуществлять нагрев и отбор выделяющегося триметилхлорсилана. Недостатки данного метода синтеза проявляются в необходимости избавления от концевых функциональных групп (атомов хлора) в уже синтезированном полиорганосилилкарбодиимиде, а также в применении весьма токсичных ор-ганохлорсиланов. Недостаточно полное устранение атомов хлора при проведении процесса обуславливает гидролитическую нестабильность продуктов реакций поликонденсации [47].



где R : $-\text{Cl}$, $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-\text{C}_3\text{H}_7$, $-\text{C}_4\text{H}_9$, $-\text{C}_6\text{H}_5$ и другие; $n = 2-4$

Рис. 15. Схема синтеза полисилилкарбодиимида по реакции конденсации ор-ганохлорсиланов с N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимидом

В работах [48, 50] показано, что можно обойтись без применения ор-ганохлорсиланов, а вместо них использовать органосиланы с алкоксильными и ацилоксильными функциональными группами, представляющими собой соединения $\text{R}_n\text{Si}(\text{OR}')_{4-n}$ и $\text{R}_n\text{Si}(\text{OC}(\text{O})\text{CH}_3)_{4-n}$, где $n = 2-4$; R : $-\text{CH}_3$, $-\text{C}_6\text{H}_5$, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$; R' : $-\text{OCH}_3$, $-\text{OC}_2\text{H}_5$. Оказалось, что взаимодействие N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимида с ор-ганоалкоксисиланами (36) и ор-ганоацилоксисиланами (37) проходит достаточно легко (рис. 16).

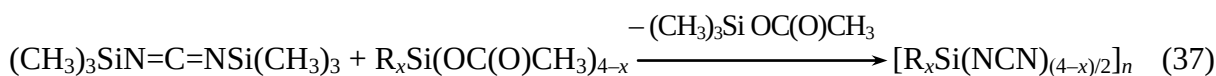
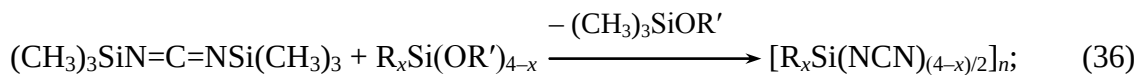


Рис. 16. Схемы синтеза полисилилкарбодиимида путем реакций конденсации функциональных органосиланов с N,N' -бис(триметилсилил)карбодиимидом

О завершении прохождения реакций синтеза полиорганосилилкарбодиимидов судили по окончании выделения соответствующих побочных продуктов, таких как триметилалкоксисилан или триметилацетилалкоксисилан. В полученном полимере атомы хлора отсутствовали, а в качестве концевых групп (в зависимости от соотношения исходных реагентов) присутствовали триметилсилильные или алкильные группы.

Заключения

Среди существующих технологий аддитивного производства одной из наиболее широко используемых является фотополимеризация в ванне благодаря простоте изготовления керамических изделий, имеющих сложные геометрические очертания и высокое разрешение. Применение предкерамических полимеров позволяет устранить ряд технических сложностей и недостатков традиционных методов аддитивного производства керамических материалов, непосредственно связанных с применением керамических частиц в составах фотоотверждаемых композиций. Отмечена перспективность применения кремнийорганических полимеров в качестве исходного сырья для изготовления керамических материалов путем фотополимеризации в ванне благодаря таким их особенностям, как высокий выход керамики; возможность синтеза полимеров, содержащих в своей структуре фотоотверждаемые группы; возможность модификации полимеров фотоотверждаемыми группами и введением дополнительных элементов, а также способность легко смешиваться с различными типами растворителей и фоточувствительных мономеров.

В первой части обзора представлены и рассмотрены основные типы предкерамических кремнийорганических полимерных прекурсоров и керамических материалов, образующихся при их пиролизе. Анализ научно-технических литературных и патентных источников позволил выявить большое разнообразие кремнийорганических предкерамических полимеров, которые можно синтезировать или модифицировать для применения в методах фотополимеризации.

Список источников

1. Padture N.P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion // *Nature Materials*. 2016. No. 15. P. 804–809. DOI: 10.1038/nmat4687.
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. Elsayed H., Carraro F., Agnoli S. et al. Direct ink writing of silica-carbon-calcite composite scaffolds from a silicone resin and fillers // *Journal of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38. P. 5200–5207. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.049.
4. Gailevicius D., Padolskyte V., Mikoliunaite L. et al. Additive-manufacturing of 3D glass-ceramics down to nanoscale resolution // *Nanoscale Horizons*. 2019. Vol. 4. No. 3. P. 647–651. DOI: 10.1039/C8NH00293B.
5. Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
6. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
7. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects // *Science*. 2015. Vol. 347. P. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
8. Малаев И.А., Пивоваров М.Л. Аддитивные технологии: применение в медицине и фармации // *Вестник фармации*. 2019. № 2 (84). С. 98–107.

9. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A., Branciforti M.C. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. P. 11906–11921. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.
10. Турченко М.В., Лебедева Ю.Е., Беляченков И.О., Прокофьев В.А. Получение керамических материалов методом стереолитографии // *Труды ВИАМ*. 2023. № 9 (127). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
11. Lacelle T., Sampson K.L., Sarvestani H.Y. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications // *APL Materials*. 2023. Vol. 11. P. 1–29. DOI: 10.1063/5.0151661.
12. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids. *Special Ceramics: Proceedings of a Symposium held at the British Ceramic Research Association, 1960*. Vol. 1. P. 168–182.
13. Production of Shaped Articles of Homogeneous Mixtures of Silicon Carbide and Nitride: pat. 3853567 US; appl. 19.04.72; publ. 02.04.73.
14. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength // *Materials Science, Chemistry*. 1975. Vol. 4. No. 9. P. 931–934. DOI: 10.1246/cl.1975.931.
15. Шестаков А.М. Керамика на основе кремнийорганических полимеров-прекурсоров: способы получения и свойства (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 11 (93). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-76-92.
16. Blum Y.D., MacQueen D.B., Kleebe H.-J. Synthesis and Characterization of Carbon-Enriched Silicon Oxycarbides // *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25. No. 2–3. P. 143–149. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.07.019.
17. Kleebe H.-J., Gregori G., Babonneau F. et al. Evolution of C-Rich SiCO Ceramics. Part I. Characterization by Integral Spectroscopic Techniques: Solid-State NMR and Raman Spectroscopy // *International Journal of Materials Research*. 2006. Vol. 97. No. 6. P. 699–709. DOI: 10.1515/ijmr-2006-0115.
18. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-derived ceramic: 40 years of research and innovation in advanced ceramics // *Journal American ceramic society*. 2010. Vol. 93. P. 1805–1837. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.03876.x.
19. Соколов Н.Н. Методы синтеза полиорганосилоксанов. М.–Л.: Гос. энерг. изд-во, 1959. 200 с.
20. Соболевский М.В., Скороходов И.И., Гриневич К.П. и др. Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение. М.: Химия, 1985. 264 с.
21. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.
22. Ширякина Ю.М., Китаева Н.С., Афанасьева Е.А., Бутузов А.В. Амфифильные соединения и гидрофобизация (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 09. URL: <http://www.viamworks.ru> (дата обращения: 01.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-99-115.
23. Шитов Р.О., Бутузов А.В. Промышленные кремнийорганические смолы (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-3-19.
24. Чернышев Е.А., Таланов В.Н. Химия элементоорганических мономеров и полимеров. М.: КолосС, 2011. 439 с.
25. Егорова Е.В., Василенко Н.Г., Демченко Н.В. и др. Поликонденсация алкоксисиланов в активной среде – универсальный метод получения полиорганосилоксанов // *Доклады Академии наук*. 2009. Т. 424. № 2. С. 200–204.
26. Тарасова Е.М., Бутузов А.В., Черкасова А.А., Иванов П.В. Изучение химической сборки макромолекул в поликонденсации дифункциональных диметилсиланов // *Тонкие химические технологии*. 2016. Т. 11. № 1. С. 59–66.

27. Способ получения полиорганосилоксанов: пат. 2547827 Рос. Федерация; заявл. 16.07.13; опубл. 10.04.15.
28. Baney R.H., Maki I., Akihito S., Toshio S. Silsesquioxanes // *Chemical Reviews*. 1995. Vol. 95. No. 5. P. 1409–1430.
29. Hurd C.B. Studies on siloxanes. 1. The specific volume and viscosity in relation to temperature and constitution // *Journal of the American Chemical Society*. 1946. Vol. 68. No. 3. P. 364–370.
30. Rasaki S.A., Xiong D., Xiong S. et al. Photopolymerization-based additive manufacturing of ceramics: A systematic review // *Journal of advanced ceramics*. 2021. Vol. 10. No. 3. P. 442–471.
31. Zhang H., Pantano C.G. Synthesis and Characterization of Silicon Oxycarbide Glasses // *Journal of the American Ceramic Society*. 1990. Vol. 73. No. 4. P. 958–963.
32. Стороженко П.А., Цирлин А.М., Губин С.П. и др. Новые бескислородные предкерамические полимеры – нано-металлополикарбосиланы и наноразмерные наполнители – уникальные материалы для повышения прочности и окислительной стойкости углеграфитов и стабилизации высокопрочной и высокотемпературной керамики // *Критические технологии. Мембраны*. 2005. № 4 (28). С. 68–74.
33. Способ получения поликарбосилана: пат. 2108348 Рос. Федерация; заявл. 30.09.96; опубл. 10.04.98.
34. Цирлин А.М., Флорина Е.К., Попова Н.А. и др. Основные закономерности синтеза волокнообразующих поликарбосиланов и технические требования к ним // *Химические волокна*. 1992. № 4. С. 16–18.
35. Li H.B., Zhang L.T., Cheng L.F. et al. Polymer–ceramic conversion of a highly branched liquid polycarbosilane for SiC-based ceramics // *Journal of materials science*. 2008. Vol. 43. P. 2806–2811. DOI: 10.1007/s10853-008-2539-8.
36. Wang Y.C., Xiao P., Zhou W. et al. Microstructures, dielectric response and microwave absorption properties of polycarbosilane derived SiC powders // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. P. 3606–3613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.101.
37. Стороженко П.А., Щербакова Г.И., Цирлин А.М. и др. Синтез наноцирконийолигокарбосиланов // *Неорганические материалы*. 2006. Т. 42. № 10. С. 1269–1277.
38. Щербакова Г.И., Блохина М.Х., Стороженко П.А. и др. Предкерамические наногафнийолигокарбосиланы // *Неорганические материалы*. 2014. Т. 50. № 4. С. 457–464.
39. Gubin S.P., Moroz E.M., Boronin A.I. et al. Nanoparticles of Ti and Zr in organosilicon polymer ceramic precursors // *Mendelevov Communication*. 1999. Vol. 9. No. 2. P. 59–61. DOI: 10.1070/MC1999v009n02ABEH001040.
40. Рыжова О.Г., Поливанов А.Н., Тимофеев И.А. Полиорганосилазаны: настоящее и будущее // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2010. № 10. С. 47–55.
41. Способ получения олигоборсилазанов: пат. 2546664 Рос. Федерация; заявл. 30.12.13; опубл. 10.04.15.
42. Krüger C.R., Rochow E.G. Polyorganosilazanes // *Journal of Polymer Science. Part A: General Papers*. 1964. Vol. 2. No. 7. P. 3179–3189. DOI: 10/1002/pol.1964.100020717.
43. Seyferth D., Stewart R.M. Synthesis and Polymerization of Cyclotetrasilazanes // *Applied Organometallic Chemistry*. 1997. Vol. 11. No. 10–11. P. 813–832.
44. Method for manufacturing a hafnium-containing silazane polymer and a method for manufacturing a ceramic from said polymer: pat. US 5296418; appl. 23.10.92; publ. 22.03.94.
45. Котрелев Г.В., Петров В.С., Жданов А.А. и др. Влияние атомов титана и циркония в цепи олигометилсилазанов на процесс их термодеструкции в условиях динамического нагрева в вакууме // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2000. Т. 42. № 2. С. 312–319.
46. Гордеев А.С., Козюков В.П., Востоков И.А. и др. Синтез и свойства кремний-, германий-, олово- и свинецсодержащих карбодиимидов и цианамидов // *Успехи химии*. 1982. Т. 51. № 5. С. 848–878.
47. Колесникова А.Б., Митрофанов М.Ю., Грузинова Е.А., Музафаров А.М. Синтез и модификация полисилилкарбодиимидов // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2007. Т. 49. № 9. С. 1628–1634.

48. Кирилин А.Д., Гаврилова А.В., Шелудяков В.Д., Шамина М.Г., Стороженко П.А. Синтез бесхлорных олигоорганосилилкарбодиимидов для создания Si/C/N-керамики // Пластические массы. 2010. № 11. С. 36–38.
49. Haag P., Lechler R., Weidlein J. Substitution Reactions of Bis(trimethylelement)Carbodiimides of Silicon and Germanium with Metal Chloride and Dimethylmetal Chlorides of Sb, Al, Ga, and In // *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*. 1994. Vol. 620. No. 1. P. 112–116.
50. Способ получения полиорганосилилкарбодиимидов: пат. 2412214 C2 Рос. Федерация; заявл. 03.02.09; опубл. 20.02.11.

References

1. Padture N.P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion. *Nature Materials*, 2016, no. 15, pp. 804–809. DOI: 10.1038/nmat4687.
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. Elsayed H., Carraro F., Agnoli S. et al. Direct ink writing of silica-carbon-calcite composite scaffolds from a silicone resin and fillers. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, pp. 5200–5207. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.049.
4. Gailevicius D., Padolskyte V., Mikoliunaite L. et al. Additive-manufacturing of 3D glass-ceramics down to nanoscale resolution. *Nanoscale Horizons*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 647–651. DOI: 10.1039/C8NH00293B.
5. Kablov E.N. The Present and Future of Additive Technologies. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
6. Kablov E.N. Additive Technologies – the Dominant of the National Technological Initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55.
7. Tumbleston J.R., Shirvanyants D., Ermoshkin N. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2015, vol. 347, pp. 1349–1352. DOI: 10.1126/science.aaa2397.
8. Malaev I.A., Pivovarov M.L. Additive technologies: application in medicine and pharmacy. *Vestnik farmatsii*, 2019, no. 2 (84), pp. 98–107.
9. Camargo I.L., Morais M.M., Fortulan C.A., Branciforti M.C. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, pp. 11906–11921. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.01.031.
10. Turchenko M.V., Lebedeva Yu.E., Belyachenkov I.O., Prokofiev V.A. Obtaining of ceramic materials by stereolithography method. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-79-89.
11. Lacelle T., Sampson K.L., Sarvestani H.Y. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications. *APL Materials*, 2023, vol. 11, pp. 1–29. DOI: 10.1063/5.0151661.
12. Ainger F.W., Herbert J.M. The Preparation of Phosphorus-Nitrogen Compounds as Non-Porous Solids. *Special Ceramics: Proceedings of a Symposium held at the British Ceramic Research Association*. 1960, vol. 1, pp. 168–182.
13. *Production of Shaped Articles of Homogeneous Mixtures of Silicon Carbide and Nitride*: pat. 3853567 US; appl. 19.04.72; publ. 02.04.73.
14. Yajima S., Hayashi J., Imori M. Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength. *Materials Science, Chemistry*, 1975, vol. 4, no. 9, pp. 931–934. DOI: 10.1246/cl.1975.931.
15. Shestakov A.M. Ceramics based on organosilicon polymers-precursors: methods of preparation and properties (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 9. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 06, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-76-92.
16. Blum Y.D., MacQueen D.B., Kleebe H.-J. Synthesis and Characterization of Carbon-Enriched Silicon Oxycarbides. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, no. 2–3, pp. 143–149. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.07.019.

17. Kleebe H.-J., Gregori G., Babonneau F. et al. Evolution of C-Rich SiCO Ceramics. Part I. Characterization by Integral Spectroscopic Techniques: Solid-State NMR and Raman Spectroscopy. *International Journal of Materials Research*, 2006, vol. 97, no. 6, pp. 699–709. DOI: 10.1515/ijmr-2006-0115.
18. Colombo P., Mera G., Riedel R., Soraru G.D. Polymer-derived ceramic: 40 years of research and innovation in advanced ceramics. *Journal American ceramic society*, 2010, vol. 93, pp. 1805–1837. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.03876.x.
19. Sokolov N.N. *Methods of synthesis of polyorganosiloxanes*. Moscow–Leningrad: State Energy Publ. House, 1959, 200 p.
20. Sobolevsky M.V., Skorokhodov I.I., Grinevich K.P. et al. *Oligoorganosiloxanes. Properties, production, application*. Moscow: Khimiya, 1985, 264 p.
21. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials: a tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, 528 p.
22. Shiriakina Yu.M., Kitaeva N.S., Afanaseva E.A., Butuzov A.V. Amphiphilic compounds and hydrophobization (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-99-115.
23. Shitov R.O., Butuzov A.V. Commercial silicone resin (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 06, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-3-19.
24. Chernyshev E.A., Talanov V.N. *Chemistry of organoelement monomers and polymers*. Moscow: KolosS, 2011, 439 p.
25. Egorova E.V., Vasilenko N.G., Demchenko N.V. et al. Polycondensation of alkoxysilanes in an active medium – a universal method for obtaining polyorganosiloxanes. *Doklady Akademii nauk*, 2009, vol. 424, no. 2, pp. 200–204.
26. Tarasova E.M., Butuzov A.V., Cherkasova A.A., Ivanov P.V. Study of chemical assembly of macromolecules in polycondensation of difunctional dimethylsilanes. *Tonkie khimicheskie tekhnologii*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 59–66.
27. *Method for producing polyorganosiloxanes*: pat. 2547827 Rus. Federation; appl. 16.07.13; publ. 10.04.15.
28. Baney R.H., Maki I., Akihito S., Toshio S. Silsesquioxanes. *Chemical Reviews*, 1995, vol. 95, no. 5, pp. 1409–1430.
29. Hurd C.B. Studies on siloxanes. 1. The specific volume and viscosity in relation to temperature and constitution. *Journal of the American Chemical Society*, 1946, vol. 68, no. 3, pp. 364–370.
30. Rasaki S.A., Xiong D., Xiong S. et al. Photopolymerization-based additive manufacturing of ceramics: A systematic review. *Journal of advanced ceramics*, 2021, vol. 10, no. 3, pp. 442–471.
31. Zhang H., Pantano C.G. Synthesis and Characterization of Silicon Oxycarbide Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, no. 4, pp. 958–963.
32. Storozhenko P.A., Tsirlin A.M., Gubin S.P. et al. New oxygen-free pre-ceramic polymers – nano-metal polycarbosilanes and nanosized fillers – unique materials for increasing the strength and oxidation resistance of carbon graphites and stabilizing high-strength and high-temperature ceramics. *Kriticheskie tekhnologii. Membrany*, 2005, no. 4 (28), pp. 68–74.
33. *Method for producing polycarbosilane*: pat. 2108348 Rus. Federation; appl. 30.09.96; publ. 10.04.98.
34. Tsirlin A.M., Florina E.K., Popova N.A. et al. Basic patterns of synthesis of fiber-forming polycarbosilanes and technical requirements for them. *Khimicheskie volokna*, 1992, no. 4, pp. 16–18.
35. Li H.B., Zhang L.T., Cheng L.F. et al. Polymer–ceramic conversion of a highly branched liquid polycarbosilane for SiC-based ceramics. *Journal of materials science*, 2008, vol. 43, pp. 2806–2811. DOI: 10.1007/s10853-008-2539-8.
36. Wang Y.C., Xiao P., Zhou W. et al. Microstructures, dielectric response and microwave absorption properties of polycarbosilane derived SiC powders. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, pp. 3606–3613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.101.

37. Storozhenko P.A., Shcherbakova G.I., Tsirlin A.M. et al. Synthesis of nanozirconium oligocarbosilanes. *Neorganicheskiye materialy*, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 1269–1277.
38. Shcherbakova G.I., Blokhina M.Kh., Storozhenko P.A. et al. Pre-ceramic nanohafnium oligocarbosilanes. *Neorganicheskiye materialy*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 457–464.
39. Gubin S.P., Moroz E.M., Boronin A.I. et al. Nanoparticles of Ti and Zr in organosilicon polymer ceramic precursors. *Mendeleev Communication*, 1999, vol. 9, no. 2, pp. 59–61. DOI: 10.1070/MC1999v009n02ABEH001040.
40. Ryzhova O.G., Polivanov A.N., Timofeev I.A. Polyorganosilazanes: present and future. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, no. 10, pp. 47–55.
41. *Method for producing oligoborosilazanes*: pat. 2546664 Rus. Federation; appl. 30.12.13; publ. 10.04.15.
42. Krüger C.R., Rochow E.G. Polyorganosilazanes. *Journal of Polymer Science. Part A: General Papers*, 1964, vol. 2, no. 7, pp. 3179–3189. DOI: 10/1002/pol.1964.100020717.
43. Seyferth D., Stewart R.M. Synthesis and Polymerization of Cyclotetrasilazanes. *Applied Organometallic Chemistry*, 1997, vol. 11, no. 10–11, pp. 813–832.
44. *Method for manufacturing a hafnium-containing silazane polymer and a method for manufacturing a ceramic from said polymer*: pat. US 5296418; appl. 23.10.92; publ. 22.03.94.
45. Kotrelev G.V., Petrov V.S., Zhdanov A.A. et al. Effect of titanium and zirconium atoms in the chain of oligomethylsilazanes on the process of their thermal destruction under dynamic heating in vacuum. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser. A*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 312–319.
46. Gordetsov A.S., Kozyukov V.P., Vostokov I.A. et al. Synthesis and properties of silicon-, germanium-, tin-, and lead-containing carbodiimides and cyanamides. *Uspekhi khimii*, 1982, vol. 51, no. 5, pp. 848–878.
47. Kolesnikova A.B., Mitrofanov M.Yu., Gruzina E.A., Muzafarov A.M. Synthesis and modification of polysilylcarbodiimides. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser. A*, 2007, vol. 49, no. 9, pp. 1628–1634.
48. Kirilin A.D., Gavrilova A.V., Sheludyakov V.D., Shamina M.G., Storozhenko P.A. Synthesis of chlorine-free oligoorganosilylcarbodiimides for the creation of Si/C/N ceramics. *Plasticheskie massy*, 2010, no. 11, pp. 36–38.
49. Haag P., Lechler R., Weidlein J. Substitution Reactions of Bis(trimethylelement)Carbodiimides of Silicon and Germanium with Metal Chloride and Dimethylmetal Chlorides of Sb, Al, Ga, and In. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 1994, vol. 620, no. 1, pp. 112–116.
50. *Method for producing polyorganosilylcarbodiimides*: pat. 2412214 C2 Rus. Federation; appl. 03.02.09; publ. 20.02.11.

Информация об авторах

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

Семина Анна Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.10.2024.

The article was submitted 21.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 24.10.2024.

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100

**ПРОЧНОСТЬ И ВЛАГОСТОЙКОСТЬ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25
НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ НАТУРНОГО И УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ***В.О. Старцев¹, О.В. Старцев², М.Р. Павлов¹, А.А. Нечаев¹*

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 «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. Проведены сравнительные испытания на стойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 к старению при экспонировании в натуральных условиях умеренно теплого и умеренного климата в течение 3 и 6 мес. и к имитационным воздействиям при двух режимах лабораторных ускоренных испытаний. Установлено, что за 6 мес. экспонирования прочность стеклопластика уменьшилась на 7 %, тогда как коэффициент диффузии влаги при режимах увлажнения и сушки повысился на 60 и 120 % соответственно. Показана перспективность использования моделей Фика и Ленгмюра для сравнения эффектов старения полимерных композиционных материалов при испытаниях в натуральных и лабораторных условиях.

Ключевые слова: стеклопластик, климатическое старение, натурная экспозиция, ускоренные испытания, прочность, коэффициент диффузии влаги, сорбция, десорбция

Для цитирования: Старцев В.О., Старцев О.В., Павлов М.Р., Нечаев А.А. Прочность и влагостойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 на начальной стадии натурального и ускоренного старения // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100.

Scientific article

**STRENGTH AND MOISTURE RESISTANCE
OF FIBERGLASS PLASTIC VPS-53/T-25
AT THE INITIAL STAGE OF NATURAL AND ACCELERATED AGING***V.O. Startsev¹, O.V. Startsev², M.R. Pavlov¹, A.A. Nechaev¹*

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

²V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Federal state Budgetary Institution of Science, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

Abstract. Comparative tests of the resistance of fiberglass VPS-53/T-25 to aging were conducted during exposure in natural conditions of moderately warm and moderate climate for 3 and 6 months and to simulating effects in two modes of laboratory accelerated tests. It was found that during 6 months of exposure the strength of fiberglass decreased by 7 %, while the moisture diffusion coefficient increased by 60 and 120 % accordingly. The prospects of using Fick and Langmuir models for comparing the effects of composite materials aging during tests in natural and laboratory conditions were shown.

Keywords: fiberglass, climatic aging, full-scale exposure, accelerated testing, strength, moisture diffusion coefficient, sorption, desorption

For citation: Startsev V.O., Startsev O.V., Pavlov M.R., Nechaev A.A. Strength and moisture resistance of fiber-glass plastic VPS-53/T-25 at the initial stage of natural and accelerated aging. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-89-100.

Введение

В нашей стране создаются новые стеклопластики, углепластики и другие полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1–3], которые не только удовлетворяют растущие потребности авиастроения и других отраслей машиностроения, но и обеспечивают технологический суверенитет Российской Федерации [4]. Достоинствами новых материалов являются высокий уровень механических показателей R и возможность длительного использования в разнообразных элементах авиационной техники.

Согласно отечественным и зарубежным стандартам [5, 6], для обоснования длительной работоспособности ПКМ измеряются механические показатели после длительного пребывания в натурных климатических условиях [7, 8], после ускоренных лабораторных испытаний [9] или их сочетаний [10, 11].

Для обеспечения необходимого методического уровня используется передовой зарубежный опыт [12–15] и отечественные разработки [16]. Закономерным следствием климатического воздействия является ухудшение механических показателей ПКМ [17]. Однако это происходит в течение длительного времени [13, 14]. Если требуется принятие оперативного решения о возможности применения нового материала, то часто приходится использовать сведения об изменении свойств ПКМ после непродолжительных испытаний, когда механические показатели изменились незначительно. В таких случаях используют разнообразные физические показатели, чувствительные к процессам старения ПКМ на ранних стадиях старения [15, 16, 18, 19].

Одним из таких показателей является коэффициент диффузии влаги D , определяемый при сушке или увлажнении в стационарных температурных условиях [20]. Этот показатель выявляет количество сорбированной влаги w и ее распределение в образцах ПКМ при различных уровнях температуры и относительной влажности воздушной атмосферы [21–23] или после нахождения в воде [24–26]. В работах [27–31] показано изменение показателей влагопереноса D , w и механических свойств R при климатическом старении образцов ПКМ разных составов, форм и размеров. Поэтому изменения D , w на начальных стадиях климатических испытаний представляют интерес для сопоставления с изменениями R и оценки чувствительности к старению ПКМ.

В работе [10] сравнили старение углепластика на основе цианэфирной матрицы при экспозиции в условиях умеренного климата и лабораторных имитационных испытаниях. При имитационных лабораторных испытаниях [32] использованы режимы термовлажностного воздействия, выдержка при отрицательной температуре, переходы от отрицательной к положительной температуре и ультрафиолетовое облучение. Предполагался принцип суперпозиции воздействующих факторов: арифметическое суммирование результатов воздействия должно обеспечивать итоговый результат, соответствующий реальному климатическому воздействию. Чтобы фиксировать все необратимые изменения прочности ПКМ, измерения выполняли сразу после съема без дополнительного кондиционирования и после сушки образцов, исключающей обратимый пластифицирующий эффект влаги.

Через 24 мес. сравнили коэффициенты сохранения показателей $k = \sigma_R / \sigma_{R0}$, где R – пределы прочности при изгибе σ_b и сжатии σ_c , индекс 0 относится к значениям механического показателя в исходном состоянии. Обнаружены различия в результатах имитационных и натурных испытаний. Например, показатель σ_b после 12 мес. экспонирования в открытых климатических условиях г. Москвы уменьшился на 11 %, а после

имитационных испытаний – только на 4 %. Возможной причиной обнаруженного несоответствия стала разная степень дополимеризации полимерной матрицы в условиях натурального и искусственного старения.

При таком способе проведения ускоренных лабораторных испытаний требуется обосновать принцип суперпозиции повреждений при последовательном чередовании агрессивных воздействий. Можно ожидать, что изменение порядка чередования имитационных факторов в лабораторных условиях приведет к иному совокупному результату по дополимеризации, деструкции, структурной релаксации полимерных матриц в ПКМ при сопоставлении с непрерывным суточным и сезонным циклированием температуры, влажности и ультрафиолетового облучения в открытых климатических условиях.

В связи с отмеченными проблемами в данной работе проанализированы результаты измерений предела прочности при изгибе и показателей влагопереноса стеклопластика ВПС-53/Т-25 после 3 и 6 мес. экспонирования в двух климатических зонах и имитационных испытаний по режимам, отличающимся очередностью агрессивных воздействий.

Материалы и методы

Для исследований выбран стеклопластик ВПС-53/Т-25 на основе стеклянной ткани марки Т-25(ВМП) и связующего ВСЭ-34 [1, 33, 34].

Плиты стеклопластика экспонировали на открытых стендах в условиях умеренно теплого климата Геленджикского центра климатических испытаний ВИАМ (ГЦКИ) и умеренного климата Московского центра климатических испытаний ВИАМ (МЦКИ). Среднегодовые климатические показатели мест экспонирования указаны в работах [16, 34].

Ускоренные (в течение 1 года) климатические испытания (УКИ), имитирующие пребывание на открытом воздухе в условиях умеренного климата, проведены по двум режимам.

Режим УКИ 1 выполнен путем последовательного проведения следующих воздействий:

- повышенная температура 40 °С и относительная влажность воздуха 93 % в течение 19 сут (ГОСТ Р 51369–99 (метод 207-2) [32]);
- отрицательная температура – согласно ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.3. [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], при –41 °С в течение 6 ч);
- перепады температуры с переходом через 0 °С – по ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.4.7 [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], 56 часовых циклов перепадов от –15 до 25 °С соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение);
- солнечное излучение в течение 58 сут при интегральной плотности потока излучения 1120 Вт/м² и плотности потока излучения 65 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5612 МДж/м² – в соответствии с ГОСТ Р 51370–99 [37].

Режим УКИ 2 выполнен путем последовательного проведения следующих воздействий:

- солнечное излучение в непрерывном режиме, совмещенное с воздействием повышенной влажности воздуха, в течение 47 сут при интегральной плотности потока излучения 1400 Вт/м² и плотности потока излучения 80 Вт/м² в интервале длин волн 300–400 нм до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5612 МДж/м²;
- экспонирование в течение 14 сут при температуре воздуха 45 °С без контроля относительной влажности, затем в течение 9,5 сут – при 40 °С и относительной влажности 93 %, в следующие 14 сут – при 45 °С без контроля относительной влажности, в оставшиеся 9,5 сут до конца воздействия – при 40 °С и относительной влажности 93 %;

– выдержка при отрицательной температуре – согласно ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.3 [35] (согласно ГОСТ 16350–80 [36], при $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 ч);

– перепады температуры с переходом через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – по ГОСТ 9.707–81 (метод 2), п. 2.5.4.7 [35]: $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч и $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч (проведено 56 циклов по ГОСТ 16350–80 [36], что соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение).

После достижения заданного времени пластины снимали с испытаний и измеряли предел прочности при изгибе σ_b по ГОСТ Р 56805–2015. Использовали исходные и экспонированные образцы без дополнительного кондиционирования (без сушки) и образцы, высушенные при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 14 сут.

Предварительно высушенные образцы размерами 50×302 мм использованы для исследования влагопереноса по двум последовательным режимам: увлажнение при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $98 \pm 2\%$ в течение 28 сут и сушка при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в эксикаторе с прокаленным силикагелем в течение 28 сут. В течение указанного времени массу образцов измеряли на аналитических весах с чувствительностью 10^{-4} г.

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

Результаты и обсуждение

В данной работе рассмотрены результаты начального этапа сравнительных климатических испытаний. В табл. 1 показано влияние режимов и продолжительности старения на предел прочности при изгибе σ_b .

Таблица 1

**Влияние режимов и продолжительности старения
на предел прочности при изгибе стеклопластика ВПС-53/Т-25**

Состояние	Продолжительность старения, мес.	Без сушки		После сушки		$\frac{\sigma_b \text{ без сушки}}{\sigma_b \text{ после сушки}}$
		σ_b , МПа	k	σ_b , МПа	k	
Исходное	0	1322 ± 21	1,00	1350 ± 21	1,00	0,98
Состаренное: в ГЦКИ	3	1220 ± 66	0,92	1293 ± 38	0,96	0,94
	6	1183 ± 20	0,90	1253 ± 30	0,93	0,94
в МЦКИ	3	1193 ± 35	0,90	1327 ± 27	0,98	0,90
	6	1150 ± 61	0,87	1330 ± 35	0,99	0,87
по режиму УКИ 1	6	1155 ± 100	0,87	1250 ± 26	0,93	0,92
	12	1257 ± 42	0,95	1255 ± 62	0,93	1,00
	18	1245 ± 28	0,94	1205 ± 38	0,89	1,00
по режиму УКИ 2	6	1158 ± 38	0,88	1195 ± 9	0,89	0,97
	12	1118 ± 35	0,85	1160 ± 74	0,86	0,96
	18	1186 ± 44	0,90	1213 ± 27	0,90	0,98

Примечание. $k = \sigma_b / \sigma_{b0}$.

Предполагая несущественное изменение показателей R стеклопластика на ранних стадиях старения, для измерения σ_b использовано по пять параллельных образцов, что позволило определить вероятные отклонения в каждой выборке, указанные в третьем и пятом столбцах табл. 1. Среднее значение вероятного отклонения измеренных значений образцов без сушки составило 3,4 % от σ_{b0} , а после сушки уменьшилось до 2,6 %. Следовательно, если коэффициенты сохранения показателя $k = \sigma_b / \sigma_{b0}$ отличаются более чем на 0,04, то это указывает на значимое отличие σ_b от исходного состояния σ_{b0} .

Необратимое уменьшение предела прочности при изгибе после 6 мес. экспонирования в ГЦКИ составило 7 %, а в МЦКИ – только 1 % (табл. 1). Такой результат соответствует общей закономерности [16], согласно которой умеренно теплый климат более агрессивен по отношению к ПКМ, чем умеренный. Снижение k до 0,87 после 6 мес. экспонирования в МЦКИ вызвано пластифицирующим действием сорбированной влаги, которое отсутствует после сушки.

Сравнение результатов воздействия режимов УКИ 1 и 2 в течение 6 мес. по показателю k после сушки показало их неэквивалентность (0,93 и 0,89 соответственно). Это позволяет предположить, что ультрафиолетовое облучение в сочетании с термовлажностным воздействием и температурными перепадами оказывает более активное влияние на свойства стеклопластика ВПС-53/Т-25 при имитации старения в течение 6 мес. Однако после имитации старения в течение 18 мес. по режимам УКИ 1 и 2 выявлено одинаковое воздействие, в результате которого необратимое изменение σ_b составляет 10–11 % (табл. 1).

На рис. 1 показаны три стадии влагопереноса образцов стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии и после старения в ГЦКИ и МЦКИ в течение 3 и 6 мес. Начальная стадия соответствует предварительной сушке, за время которой определено количество накопленной влаги. Затем следуют стадии увлажнения и сушки. Для аппроксимации зависимостей относительного содержания влаги от времени $w(t)$ использовали второй закон Фика в одномерном приближении.

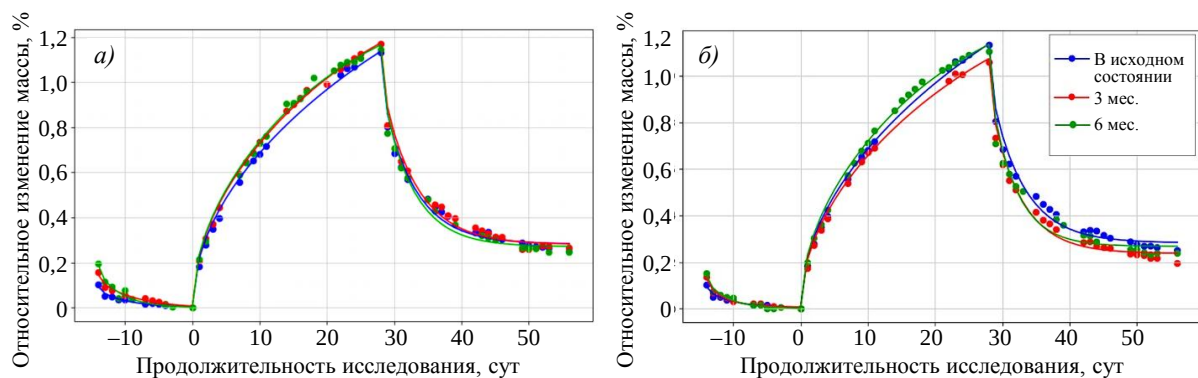


Рис. 1. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после натурной экспозиции в г. Геленджике (а) и г. Москве (б) в течение 3 и 6 мес.: ● – экспериментальные данные; — аппроксимация с использованием модели Фика

С помощью вычислений, проведенных согласно рекомендациям работ [38–40], определены значения коэффициента диффузии влаги D , а также предельного влагосодержания по формуле

$$w_{\max} = \frac{m_{\max} - m_0}{m_0} \cdot 100 \%,$$

где m_0 – масса предварительно высушенного образца; $m_{\max}$ – масса образца с максимальным содержанием влаги.

Результаты вычислений для всех серий испытанных образцов представлены в табл. 2.

Коэффициент детерминации модели Фика оказался высоким и изменялся от 0,970 до 0,984. Для достижения более высокой точности использована также одномерная модель Ленгмюра, в которой, кроме показателей D и $w_{\max}$, вычисляются также

вероятности в единицу времени превращения связанной воды в мобильную (β) и мобильной воды в связанную (γ) по рекомендациям работ [41–43].

Таблица 2

Влияние режимов и продолжительности старения на показатели модели Фика

Состояние	Продолжительность старения, мес.	После увлажнения		После сушки	
		D , мм ² /сут	$w_{\max}$, %	D , мм ² /сут	$w_{\max}$, %
Исходное	0	0,011	1,8	0,083	0,85
Состаренное: в ГЦКИ	3	0,017	1,6	0,079	0,89
	6	0,020	1,5	0,089	0,89
в МЦКИ	3	0,015	1,5	0,090	0,84
	6	0,020	1,4	0,106	0,87
по режиму УКИ 1	6	0,020	1,5	0,074	0,92
	12	0,026	1,4	0,101	0,93
	18	0,031	1,2	0,095	0,96
по режиму УКИ 2	6	0,017	1,5	0,088	0,89
	12	0,019	1,5	0,076	0,91
	18	0,025	1,3	0,088	0,90

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги, $w_{\max}$ – влагосодержание.

На рис. 2 показано сравнение кинетических кривых $w(t)$ по модели Ленгмюра для исходных образцов и образцов, испытанных по режимам УКИ 1 и 2. Сопоставление показателей влагопереноса в стеклопластике ВПС-53/Т-25 после старения по всем изученным режимам представлено в табл. 3.

Модель Ленгмюра повысила коэффициент детерминации до $0,9990 \pm 0,0005$, т. е. показала полное соответствие измеренным значениям влагопоглощения. Проанализировано изменение показателей D и $w_{\max}$ в течение 6 мес. испытаний. На стадии сорбции при практически стабильном значении $w_{\max}$ показатель D увеличился на 15 и 60 % после экспозиции в ГЦКИ и МЦКИ соответственно. При этом на стадии сушки прирост коэффициента диффузии при десорбции влаги составил 123 и 77 % соответственно. Из этого следует главный вывод: коэффициент диффузии влаги более чувствителен к физико-химическим превращениям в эпоксидной полимерной матрице, происходящим при старении, чем предел прочности при изгибе.

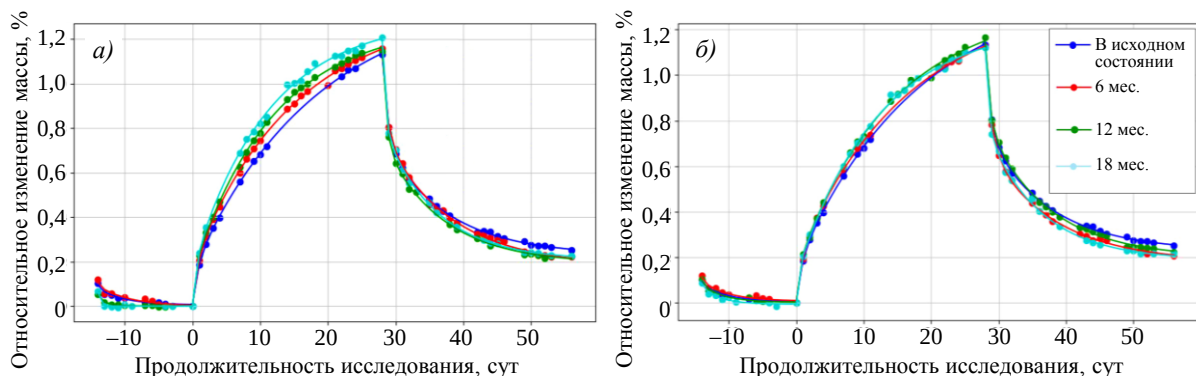


Рис. 2. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после старения по режимам УКИ 1 (а) и 2 (б) в течение 6, 12 и 18 мес.: ● – экспериментальные данные; — аппроксимация с использованием модели Ленгмюра

Значительная часть сорбированной влаги осталась в объеме стеклопластика после завершения стадии повторной сушки, по-видимому, в результате химического взаимодействия с гидрофильными группами связующего ВСЭ-34. Этот вывод подтверждается сравнением показателей β и γ : на стадии увлажнения возрастает вероятность превращения мобильной воды в связанную (γ увеличивается от 0,43 до 0,64), и эта тенденция сохраняется на стадии сушки (γ увеличивается от 0,14 до 0,24 после старения в г. Геленджике).

Таблица 3

Влияние режимов и продолжительности старения на показатели модели Ленгмюра

Состояние	Продолжительность старения, мес.	После увлажнения				После сушки			
		D , мм ² /сут	$w_{\max}$, %	β , сут ⁻¹	γ , сут ⁻¹	D , мм ² /сут	$w_{\max}$, %	β , сут ⁻¹	γ , сут ⁻¹
Исходное	0	0,48	1,4	0,055	0,43	0,44	0,91	0,11	0,14
Состаренное: в ГЦКИ	3	0,48	1,4	0,061	0,39	0,68	0,93	0,12	0,20
	6	0,55	1,3	0,072	0,64	0,98	0,92	0,13	0,24
в МЦКИ	3	0,47	1,3	0,063	0,48	0,41	0,88	0,11	0,13
	6	0,77	1,3	0,071	0,56	0,78	0,92	0,11	0,13
по режиму УКИ 1	6	0,45	1,3	0,067	0,42	0,49	0,97	0,10	0,16
	12	1,01	1,3	0,084	0,62	0,61	0,97	0,11	0,15
	18	0,68	1,3	0,089	0,58	0,80	1,00	0,13	0,20
по режиму УКИ 2	6	0,40	1,3	0,062	0,39	0,38	0,95	0,10	0,12
	12	0,84	1,3	0,072	0,56	0,57	0,95	0,11	0,19
	18	0,91	1,2	0,082	0,75	0,81	0,93	0,12	0,21

Примечание. D – коэффициент диффузии влаги, $w_{\max}$ – влагосодержание, β и γ – вероятности в единицу времени превращения связанной воды в мобильную и мобильной воды в связанную.

После продолжения испытаний до 18–24 мес. можно ожидать дальнейшее изменение показателя k и характеристик влагопереноса D и $w_{\max}$, что позволит более обоснованно сопоставить эквивалентность режимов УКИ 1 и 2, выяснить причины возможных различий и дать рекомендации по выбору режимов ускоренных испытаний ПКМ.

Заключения

Экспонирование стеклопластика ВПС-53/Т-25 в открытых условиях умеренного и умеренно теплого климата приводит к необратимому изменению предела прочности при изгибе на 1–7 %, что подтверждает высокую климатическую стойкость материала, определенную в работах [33, 34].

Сравнение результатов воздействия режимов УКИ 1 и 2 по показателю k после сушки показало их неэквивалентность (0,93 и 0,89 соответственно).

При таких незначительных изменениях механического показателя выявлена высокая чувствительность коэффициента диффузии влаги, который в режиме увлажнения повысился на 15 и 60 % после экспозиции в ГЦКИ и в МЦКИ, в режиме сушки – на 123 и 77 % соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности оценки климатической стойкости современных ПКМ на ранних стадиях климатического воздействия по показателям влагопереноса.

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: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексагин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
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. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Сутубалов А.И. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 1. Растяжение // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
7. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012. No. 4. P. 323–329.
8. 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: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
9. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имамметдинов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
10. Старцев В.О., Нечаев А.А. Влияние натурных и ускоренных климатических испытаний на прочность наномодифицированного углепластика // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 3 (72). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
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: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Heinrick M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions // MOJ Polymer Science. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 18–24.
13. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests // Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction. Quebec, 2007. P. 159–166.
14. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates // Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012). Rome, 2012. Paper 11-096.
15. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing // Materials. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 1533.
16. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 520 с.
17. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. М., 2015. Т. 13: Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. 270 с.

18. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. No. 2. P. 227–240.
19. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the Properties of BSR-3M Binder in VKU-46 Carbon-Fiber-Reinforced Polymer after Prolonged Climatic Aging // *Polymer Science. Ser.: D*. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 687–693.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2023. Vol. 62. No. 14. P. 1789–1822.
21. Loos A.C., Springer G.S. Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air // *Journal of Composite Materials*. 1979. Vol. 13. No. 2. P. 131–147.
22. Mei J., Tan P.J., Liu J. et al. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019. Vol. 127. Art. 105647.
23. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution Uptake in Cylindrical Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Tendons // *Advances in Polymer Technology*. 2022. Vol. 2022. Art. 1981256.
24. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M. A comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites // *Polymer Composites*. 2022. Vol. 43. No. 1. P. 118–129.
25. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite // *Journal of Composite Materials*. 2022. Vol. 56. No. 14. P. 2189–2199.
26. Aithal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions // *Iranian Polymer Journal*. 2023. Vol. 32. No. 7. P. 873–885.
27. Hussnain S.M., Shah S.Z.H., Megat-Yusoff P.S.M., Hussain M.Z. Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements // *Polymer Degradation and Stability*. 2023. Vol. 215. Art. 110452.
28. Mayandi K., Rajini N., Ayrilmis N. et al. An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 6. P. 15962–15988.
29. Kychkin A.K., Gavriliyeva A.A., Vasilieva A.A. et al. Assessment of Extremely Cold Subarctic Climate Environment Destruction of the Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFRE) Rebar Using Its Moisture Uptake Kinetics // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 24. Art. 4325.
30. Kychkin A.K., Gavriliyeva A.A., Kychkin A.A. et al. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities // *Polymers*. 2024. Vol. 16. No. 7. Art. 866.
31. Кычкин А.К., Гаврильева А.А., Васильева Е.Д. и др. Исследование стекло- и базальтотекстолитов по кинетике сорбции и десорбции влаги после экспонирования в условиях холодного климата // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 336–342.
32. ГОСТ Р 51369–99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности. М.: Изд-во стандартов, 2000. 15 с.
33. Коваль Т.В., Велигодский И.М., Громова А.А. Исследование пластифицирующего влияния влаги на свойства ПКМ на основе эпоксидного связующего ВСЭ-34 после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
34. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика ВПС-53К // *Известия Самарского научного центра Российской Академии наук*. 2017. Т. 19. № 4 (2). С. 220–228.
35. ГОСТ 9.707–81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. М.: Изд-во стандартов, 1990. 79 с.

36. ГОСТ 16350–80. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1981. 150 с.
37. ГОСТ Р 51370–99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. М.: Изд-во стандартов, 2000. 11 с.
38. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
39. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
40. Crank J. The mathematics of diffusion. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
41. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites // *Journal of Composite Materials*. 1981. Vol. 15. No. 5. P. 272–293.
42. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins // *Journal of Composite Materials*. 1978. Vol. 12. No. 5. P. 118–131.
43. Glaskova T.I., Guedes R.M., Morais J.J., Aniskevich A.N. A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder // *Mechanics of Composite Materials*. 2007. Vol. 43. No. 4. P. 377–388.

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), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
3. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
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. Shershak P.V., Yakovlev N.O., Sutubalov A.I. Standards for testing polymer composite materials. Part 1. Tensile properties. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-152-166.
6. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
7. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2012, no. 4, pp. 323–329.
8. 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: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
9. Mishurov K.S., Pavlovskiy K.A., Imametdinov E.Sh. Environmental effects on properties of CFRP (carbon fiber reinforced plastic) VKU-271. *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
10. Startsev V.O., Nechaev A.A. The influence of natural and accelerated weathering on the nanomodified CFRP'S strength. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.

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: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Heinrich M., Crawford B., Milani A.S. Degradation of Fibreglass Composites under Natural Weathering Conditions. *MOJ Polymer Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 18–24.
13. Nishizaki I., Kishima T., Sasaki I. Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests. *Third International Conference on Durability & Field Applications of FRP Composites for Construction*. Quebec, 2007, pp. 159–166.
14. Nishizaki I., Sasaki I., Tomiyama T. Outdoor exposure tests of pultruded CFRP plates. *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*. Rome, 2012, paper 11-096.
15. Cruz R., Correia L., Dushimimana A. et al. Durability of Epoxy Adhesives and Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Used in Strengthening Systems: Accelerated Ageing versus Natural Ageing. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 6, p. 1533.
16. Kablov E.N., Startsev V.O., Laptev A.B. *Aging of polymer composite materials*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 520 p.
17. *Aviation materials: reference book in 13 vols*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2015, vol. 13: Climatic and microbiological resistance of non-metallic materials, 270 p.
18. Startsev O.V., Vapirov Y.M., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Comparison of Glass-Transition Temperatures for Epoxy Polymers Obtained by Methods of Thermal Analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 227–240.
19. Koval' T.V., Veligodskii I.M., Gromova A.A. Change in the Properties of BSR-3M Binder in VKU-46 Carbon-Fiber-Reinforced Polymer after Prolonged Climatic Aging. *Polymer Science. Ser.: D*, 2023, vol. 16, no. 3, pp. 687–693.
20. Korkees F. Moisture absorption behavior and diffusion characteristics of continuous carbon fiber reinforced epoxy composites: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2023, vol. 62, no. 14, pp. 1789–1822.
21. Loos A.C., Springer G.S. Moisture Absorption of Graphite-Epoxy Composites Immersed in Liquids and in Humid Air. *Journal of Composite Materials*, 1979, vol. 13, no. 2, pp. 131–147.
22. Mei J., Tan P.J., Liu J. et al. Moisture absorption characteristics and mechanical degradation of composite lattice truss core sandwich panel in a hygrothermal environment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 127, art. 105647.
23. Scott P., Toumpanaki E., Lees J.M. Solution Uptake in Cylindrical Carbon-Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Tendons. *Advances in Polymer Technology*, 2022, vol. 2022, art. 1981256.
24. Almudaihesh F., Holford K., Pullin R., Eaton M. A comparison study of water diffusion in unidirectional and 2D woven carbon/epoxy composites. *Polymer Composites*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 118–129.
25. Bone J.E., Sims G.D., Maxwell A.S. et al. On the relationship between moisture uptake and mechanical property changes in a carbon fibre/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 2022, vol. 56, no. 14, pp. 2189–2199.
26. Aithal S., Hossagadde P.N., Kini M.V., Pai D. Durability study of quasi-isotropic carbon/epoxy composites under various environmental conditions. *Iranian Polymer Journal*, 2023, vol. 32, no. 7, pp. 873–885.
27. Hussnain S.M., Shah S.Z.H., Megat-Yusoff P.S.M., Hussain M.Z. Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, vol. 215, art. 110452.
28. Mayandi K., Rajini N., Ayrilmis N. et al. An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 15962–15988.
29. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Vasilieva A.A. et al. Assessment of Extremely Cold Subarctic Climate Environment Destruction of the Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFRE) Rebar Using Its Moisture Uptake Kinetics. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 24, art. 4325.

30. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Kychkin A.A. et al. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 7, art. 866.
31. Kychkin A.K., Gavrilieva A.A., Vasilyeva E.D. et al. Study of glass and basalt textolites by the kinetics of moisture sorption and desorption after exposure to cold climate conditions. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2024, vol. 103, no. 4, pp. 336–342.
32. State Standard R 51369–99. *Test methods for resistance to climatic external influencing factors of machines, devices and other technical products. Tests for exposure to humidity*. Moscow: Publishing House of Standards, 2000, 15 p.
33. Koval T.V., Veligodsky I.M., Gromova A.A. Study of the plasticizing effect of moisture on the properties of VSE-34 binder based PCMS after 5 years exposure in the different climate zones. *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 15, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-105-116.
34. Startsev V.O., Molokov M.V., Postnov V.I., Starostina I.V. Assessment of the influence of climatic impact on the properties of fiberglass VPS-53K. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk*, 2017, vol. 19, no. 4 (2), pp. 220–228.
35. State Standard 9.707–81. *Unified system of protection against corrosion and aging. Polymer materials. Methods of accelerated tests for climatic aging*. Moscow: Publ. house of standards, 1990, 79 p.
36. State Standard 16350–80. *Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes*. Moscow: Publ. house of standards, 1981, 150 p.
37. State Standard R 51370–99. *Methods of testing resistance to climatic external influencing factors of machines, devices and other technical products. Testing for exposure to solar radiation*. Moscow: Publ. House of Standards, 2000, 11 p.
38. Carslow G., Eger D. *Thermal conductivity of solids*. Moscow: Nauka, 1964, 488 p.
39. Lykov A.V. *Theory of thermal conductivity*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
40. Crank J. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon press, 1975, 414 p.
41. Bonniau P., Bunsell A.R. A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 1981, vol. 15, no. 5, pp. 272–293.
42. Carter H.G., Kibler K.G. Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Journal of Composite Materials*, 1978, vol. 12, no. 5, pp. 118–131.
43. Glaskova T.I., Guedes R.M., Morais J.J., Aniskevich A.N. A comparative analysis of moisture transport models as applied to an epoxy binder. *Mechanics of Composite Materials*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 377–388.

Информация об авторах

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

Старцев Олег Владимирович, и. о. директора, д.т.н., ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

Павлов Михаил Рашитович, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Нечаев Александр Андреевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Oleg V. Startsev, Acting Director, Doctor of Sciences (Tech.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS Federal state Budgetary Institution of Science, administration@iptpn.ysn.ru

Mikhail R. Pavlov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Nechaev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.11.2024.

The article was submitted 28.08.2024; approved and accepted for publication after reviewing 12.11.2024.

Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116

ИСПЫТАНИЯ НА СРЕЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

В.С. Ерасов¹, И.Г. Сибаяев¹, А.И. Сутубалов¹

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

Аннотация. Приведен анализ отечественных и зарубежных методик механических испытаний конструкционных авиационных композиционных материалов и покрытий на срез. Представлены виды оснасток на срез и их основные отличия. Показано развитие методик испытания методами инструментального индентирования и царапанием (склерометрия), при которых разрушение происходит при срезе материала индентором. Представлены типичная диаграмма среза в координатах «нагрузка–перемещение пуансона», диаграммы внедрения и царапания инденторами, фотографии царапины без разрушения и со следами разрушения на деформируемой поверхности.

Ключевые слова: срез, образец, покрытие, деформация, напряжение, разрушение, ламинат, волокно, склерометрия

Для цитирования: Ерасов В.С., Сибаяев И.Г., Сутубалов А.И. Испытания на срез конструкционных авиационных материалов и покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116.

Scientific article

SLICE TESTING OF STRUCTURAL AVIATION MATERIALS AND COATINGS

V.S. Erasov¹, I.G. Sibayev¹, A.I. Sutubalov¹

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 provides an analysis of domestic and foreign methods of mechanical testing of structural aviation composite materials and coatings on a slice. The types of cross-section fittings and their main differences are presented. The development of testing methods by instrumental indentation and scratching (sclerometry) is shown, in which destruction occurs by cutting the material with an indenter. A typical slice diagram in the coordinates «load–displacement of the punch», diagrams of embedding and scratching with indentors, photographs of scratches without destruction and with traces of destruction on the deformable surface are presented.

Keywords: slice, sample, coating, deformation, stress, fracture, laminate, fiber, sclerometry

For citation: Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I. Slice testing of structural aviation materials and coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-101-116.

Введение

Конструкционные авиационные материалы испытывают на срез для оценки целесообразности изготовления из них шпилек, заклепок, болтов и других деталей крепления, работающих на срез, для определения нагрузки при пробивке отверстий в листах, исследования материалов слоистых покрытий, влияния на них химико-термической обработки и климатических факторов.

С целью получения значений механических характеристик, необходимых для расчетов деталей на прочность, испытания проводят в условиях нагружения, реализующих разрушение образца срезом [1–14], в том числе используют методы испытания вдавливанием индентора и царапанием поверхности образца (склерометрия) алмазной четырехгранной или трехгранной пирамидой, конусом или цилиндром [15–35].

В данной статье приведен анализ методик испытаний на срез по российским и зарубежным стандартам. Показано развитие методик испытания вдавливанием индентора и царапанием.

Приспособления и испытания стандартных макрообразцов

Для испытаний стандартных макрообразцов используют специальные приспособления. Если из материала можно изготовить цилиндрические образцы и детали крепления, их испытывают на двойной срез в приспособлении типа соединения «вилка–проушина» (рис. 1).

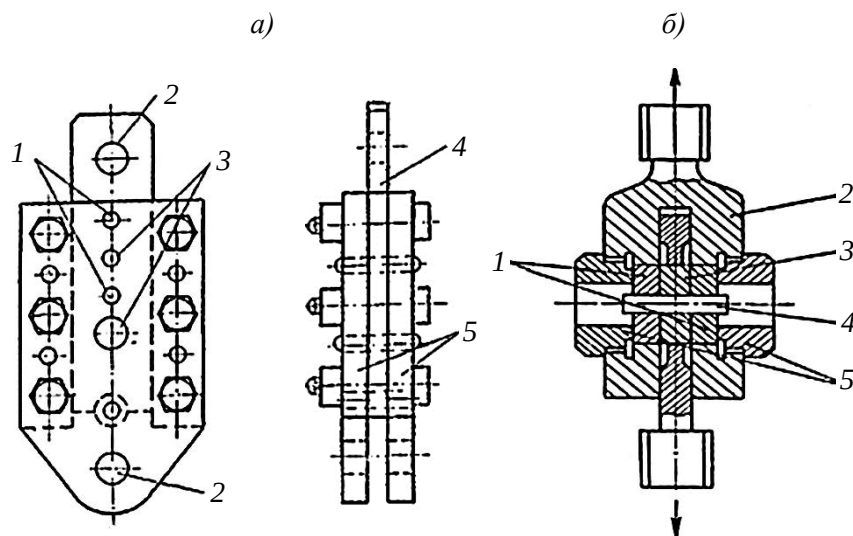


Рис. 1. Схемы приспособлений типа соединения «вилка–проушина» для испытаний на двойной срез: а) 1 – отверстия для удаления выталкивателем частей разрушенного образца; 2 – отверстия для крепления приспособления в захватах испытательной машины; 3 – отверстия для образца; 4 – нож; 5 – щеки; б) 1 – щеки; 2 – корпус; 3 – нож; 4 – образец; 5 – вкладыш [2]

Приведенные на рис. 1 схемы приспособлений предназначены для испытаний на растяжение, но могут быть легко приспособлены и для приложения сжимающих нагрузок. Основные детали приспособлений изготавливают из инструментальной стали высокой твердости с $HRC \geq 60$. Соприкасающиеся поверхности ножей и щек должны быть обработаны шлифованием, по этим поверхностям должна обеспечиваться скользящая посадка по третьему классу точности ($H8/h8$, $H9/h8$, $H9/h9$). Класс посадки регламентирует зазор между щеками и ножом, устанавливаемый при сборке приспособления (рис. 1, а) или регулируемый с помощью вкладышей 5 (рис. 1, б). Точность

изготовления отверстий должна соответствовать третьему классу в системе отверстий (H8, H9). Диаметр отверстий должен превышать диаметр образца не более чем на 0,1 мм. Установка образца в отверстие с натягом не допускается.

Толщину ножей и щек регламентируют в зависимости от диапазона диаметров образцов – например, для диаметров от 8 до 12 мм толщина ножа должна составлять 12 мм, а каждой щеки: 8 мм.

Стандарт [7] предусматривает использование приспособления с открытой матрицей (рис. 2), включающего основание (рис. 2, а, з) для размещения в нем матрицы (рис. 2, а, в), в которой перемещается нож (рис. 2, б). В матрице вместо отверстия для цилиндрического образца (болта) выполнен ложемент полуцилиндрической формы. Нож также имеет гнездо под образец в форме полуцилиндрического ложемента. Для каждого диаметра образца назначают свой диаметр ложементов в матрице и ноже. Толщина ножа равна диаметру образца, толщины щек матрицы равны половине диаметра образца. Максимальный зазор между ножом и щеками матрицы 0,08 мм. Диаметр ложемента не должен превышать номинальный диаметр образца более чем на 0,03 мм. Установлены требования по допускам размеров и расположения конструктивных элементов для обеспечения жесткости конструкции. Регламентированы требования к режущим кромкам и максимальной ширине образующейся при изнашивании фаски. После достижения установленного износа кромок необходимо провести переточку деталей.

Основным преимуществом приспособления является простота подготовки и проведения испытания. Однако выполнение матрицы в форме открытого полуцилиндрического ложемента снижает жесткость крепления образца и допускает его изгиб в процессе приложения нагрузки.

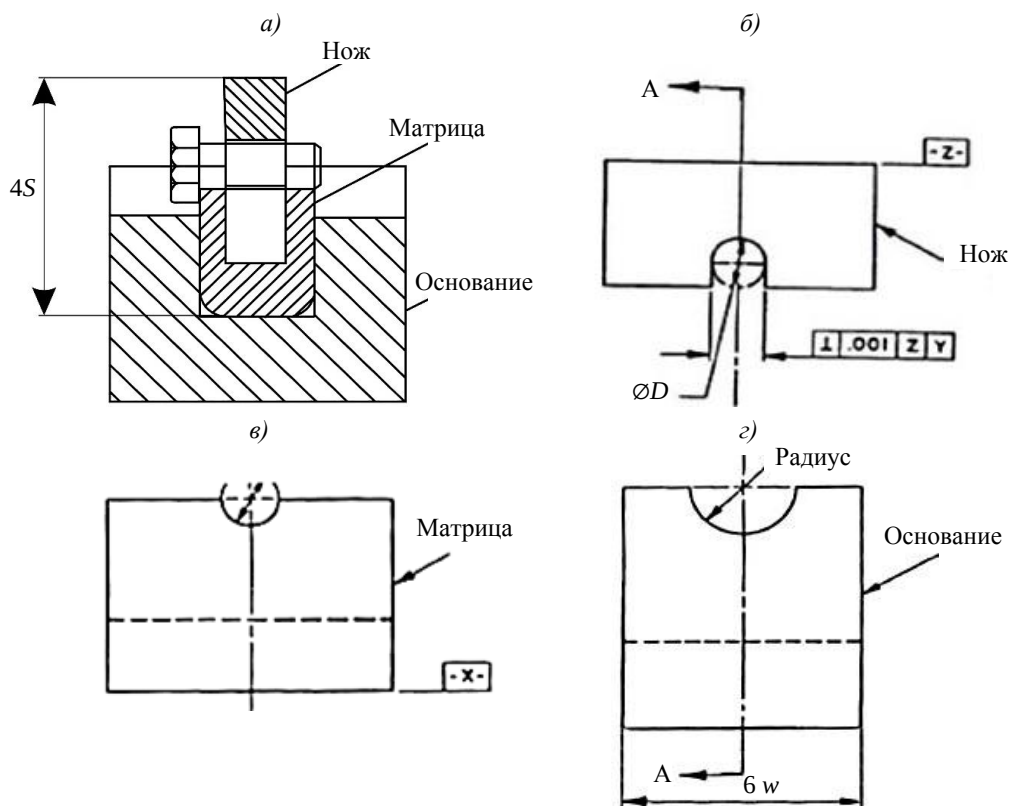


Рис. 2. Схема приспособления с открытой матрицей: общий вид (а) и вид сбоку ножа (б), матрицы (в) и обоймы матрицы (г) [1]

Сопротивление двойному срезу определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = 2P/\pi d^2, \quad (1)$$

где P – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – исходный диаметр образца, м.

Величина $\tau_{\text{ср}}$ зависит от условий испытания: на нее влияет вид и качество используемого приспособления, скорость нагружения или перемещения активной траверсы испытательной машины. Условия испытаний должны регламентироваться. Стандарты устанавливают скорость перемещения ножа относительно щек не более 10 мм/мин в стандарте [6] и не более 19 мм/мин и обеспечение скорости роста напряжения не более 689 МПа/мин в стандартах [10, 11].

Образцы вырезают механическим способом из полуфабриката или готового крепежного изделия. Они должны иметь стабильные размеры, предусмотренные стандартами на испытания (диаметр образца может меняться от 2 до 25 мм). Такие дефекты, как следы резца, царапины, вмятины, трещины, чернота и окалина, недопустимы. Возможны испытания самих крепежных изделий: болтов, винтов, шпилек.

Испытание на двойной срез предпочтительнее испытания на одинарный срез, реализуемый в приспособлении, имитирующем соединение пластин внахлест (рис. 3). При одинарном срезе сильнее проявляется влияние изгиба, а следовательно, влияние возникающих от него нормальных напряжений. На одинарный срез испытывают детали крепления, длина которых не позволяет использовать приспособления для двойного среза.

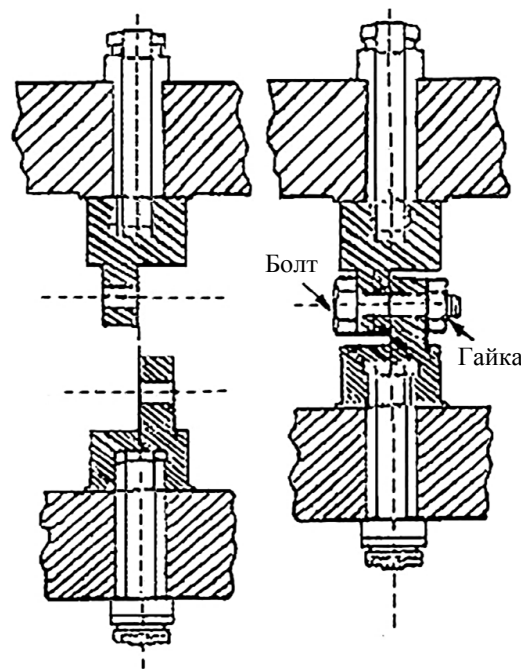


Рис. 3. Схема приспособления для испытания на одинарный срез [2]

Сопротивление одинарному срезу определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = 4P/\pi d^2, \quad (2)$$

где P – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – исходный диаметр образца, м.

Для оценки сопротивления срезу по толщине пластины проводят испытания на срез по круговому контуру в приспособлениях, схемы которых приведены в источниках [2, 3, 11–13]. Одна из схем представлена на рис. 4. Образец в форме круглой или

квадратной пластинки продавливают цилиндрическим пуансоном с плоским торцом через матрицу с круглым отверстием. Фиксирующее кольцо позволяет установить образец в положение, симметричное относительно отверстия, и ограничивает боковое перемещение образца.

В приспособлениях, рекомендуемых стандартами [11, 12], пластину крепят к пуансону. В патенте [13] устранены такие недостатки приспособлений, как их конструктивная сложность, а также высокая трудоемкость при эксплуатации. В результате перекоса плит приспособления может заклинивать в процессе сборки-разборки из-за маленьких зазоров между штоками нижней плиты и стенками отверстий под них в верхней плите, а также из-за небольшой толщины верхней плиты. Приспособления имеют много поверхностей, требующих точной обработки, минимальные допуски формы и размеров при выполнении отверстий, штоков и пуансона.

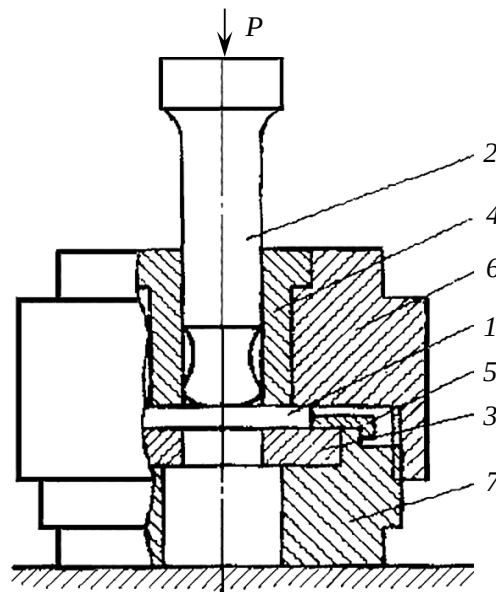


Рис. 4. Схема приспособления для испытания на срез листа по круговому контуру: 1 – образец; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – направляющая втулка; 5 – фиксирующее кольцо; 6 – прижимная гайка; 7 – основание [3]

Конструкция приспособления, представленная на рис. 5, повышает точность сборки приспособления и за счет этого – стабильность результатов испытаний. Приспособление содержит срезающий пуансон 2, свинчиваемые по резьбе матрицу 5 и прижим 6, отверстие 9 в пуансоне с болтом 3 для крепления образца 1, центрирующие пояски 7 и 8, прижим имеет выступ 14 в верхней части.

Согласно справочному пособию [3], оптимальными соотношениями размеров образца и элементов приспособления являются: $d/h = 4 \div 10$ (где d – диаметр пуансона; h – толщина образца); радиус скругления кромки пуансона $r = (0,012 \div 0,025) \cdot d/2$; зазор между пуансоном и матрицей – не более 0,1 мм.

Типичная диаграмма деформирования листа в координатах «нагрузка P – перемещение пуансона Δh » представлена на рис. 6. Диаграмма при пластичном срезе гладкая и похожа на диаграмму растяжения: имеет участок упругого деформирования (до точки P_T), участки упрочнения (от точки P_T до точки P_B) и разупрочнения (от точки P_B до точки P_K). Диаграмма среза композиционного слоистого малопластичного материала может иметь скачки по нагрузке, вызванные разным сопротивлением срезу отдельных слоев.

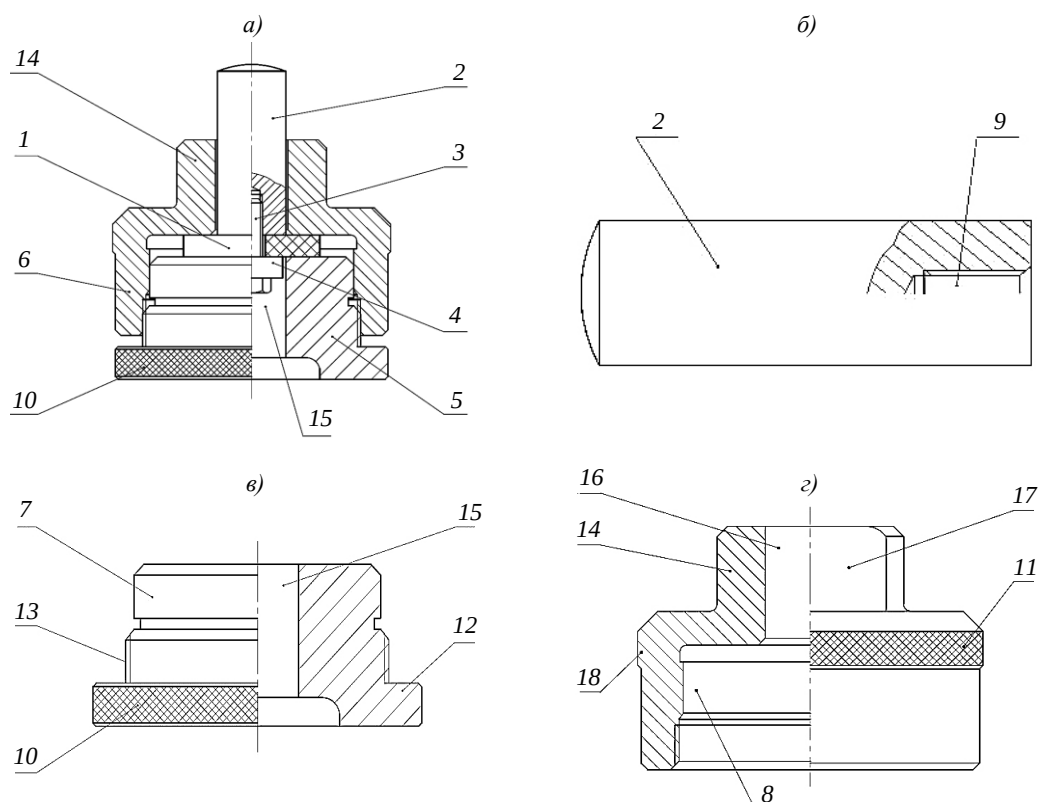


Рис. 5. Конструкция приспособления для испытания пластин на срез: устройство в сборе (а); срезающий пуансон (б); матрица (в); прижим (г); элементы: 1 – образец для испытания; 2 – срезающий пуансон; 3 – болт; 4 – шайба; 5 – матрица; 6 – прижим; 7 – центрирующий пояс матрицы; 8 – центрирующий пояс прижима; 9 – отверстие с резьбой для болта; 10 – рифление на внешней поверхности матрицы; 11 – рифление на внешней поверхности прижима; 12 – буртик с рифлением на матрице; 13 – резьба; 14 – выступ в верхней части прижима; 15 – центральное отверстие матрицы; 16 – центральное отверстие прижима; 17 – лыски под ключ; 18 – буртик с рифлением на прижиме [13]

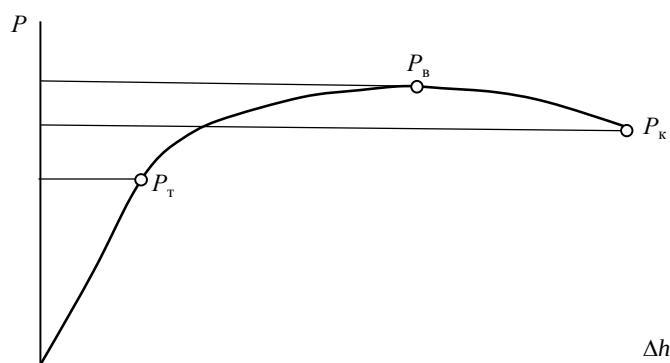


Рис. 6. Типичная диаграмма деформирования листа при испытании на срез по круговому контуру [2]

Сопротивление при испытании на срез по круговому контуру определяют по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = P_{\text{в}} / \pi d h, \quad (3)$$

где $P_{\text{в}}$ – наибольшая нагрузка при испытании, Н; d – диаметр пуансона, м; h – толщина образца, м.

Испытания образцов проводят, как правило, на универсальных испытательных машинах, обеспечивающих нагружение образцов по схеме одноосного растяжения или сжатия и измерение нагрузки с погрешностью не более $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Для металлических пластичных материалов сопротивление срезу можно определить пересчетом по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = K \cdot \sigma_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{в}}$ – прочность (предел прочности, временное сопротивление) при растяжении, МПа; K – коэффициент: 0,55 – для алюминиевых сплавов; 0,56 – для титановых сплавов; 0,63 – для сталей с $\sigma_{\text{в}} = 800\text{--}1200$ МПа; 0,70 – для сталей с $\sigma_{\text{в}} \leq 800$ МПа [15].

Для композиционных авиационных материалов такая практика пересчета отсутствует. Поэтому целесообразна актуализация стандарта [6] или разработка нового стандарта с унифицированными требованиями к приспособлениям и условиям испытания.

Испытания на срез от макро- до наноуровня

Прогресс материаловедения определяют экспериментальные и теоретические исследования, базирующиеся на высокой квалификации ученых, развитых приборной и испытательной базах. Необходимость определения механических свойств малых объемов материала: тонких и сверхтонких пленок, границ раздела в композиционных материалах, поверхностей толщиной в несколько атомных слоев, отдельных структурных составляющих – вызвала развитие метода инструментального индентирования, его соединение с испытанием царапанием, при котором материал деформируют и разрушают алмазным индентором [16–33, 36–42].

Разработаны прецизионные универсальные испытательные машины малых размеров с компьютерным управлением нагружением исследуемого образца и регистрацией многочисленных изучаемых параметров (рис. 7). Машины позволяют проводить «мягкое» (управление нагрузкой) и «жесткое» (управление деформацией) нагружения. При испытании определяют коэффициент трения, характеристики шероховатости поверхности, характеристики инструментального индентирования и царапания, акустическую эмиссию, а также проводят оптическую и атомно-силовую микроскопию. Каждый показатель регистрируют с высокой (несколько тысяч герц) частотой и синхронизируют между собой [43–50].

Испытания и исследования проводят по стандартам. Следует отметить тот факт, что стандартизация таких исследований пока отстает от возможностей испытательных машин малых размеров. Ограничение связано с высокой стоимостью, сложностью применения и обслуживания машин. В настоящее время универсальные испытательные машины малых размеров можно встретить в основном в исследовательских лабораториях вузов и НИИ.

Показатели среза на этих машинах пока не определяют. Причина этого – отсутствие теоретических основ для выделения из показателей твердости значений срезающих касательных напряжений. В данной статье такая попытка сделана и выведены формулы для расчета напряжения среза от макро- до наноуровня.

Твердость – свойство материала сопротивляться проникновению в него другого упругого жесткого тела, которое при этом не получает остаточных деформаций. В зависимости от нагружаемого объема материала разделяют макро-, микро- и нанотвердость. Применяют различные способы определения твердости материала образцов и изделий для характеристики их механических свойств. На поверхность материалов

воздействуют наконечниками из закаленной стали или алмаза, а также твердого сплава в форме шара, конуса, пирамиды, цилиндра с плоским дном. Величина твердости и ее размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Пересчет значений твердости, определяемой разными методами, производится по таблицам и эмпирическим формулам.

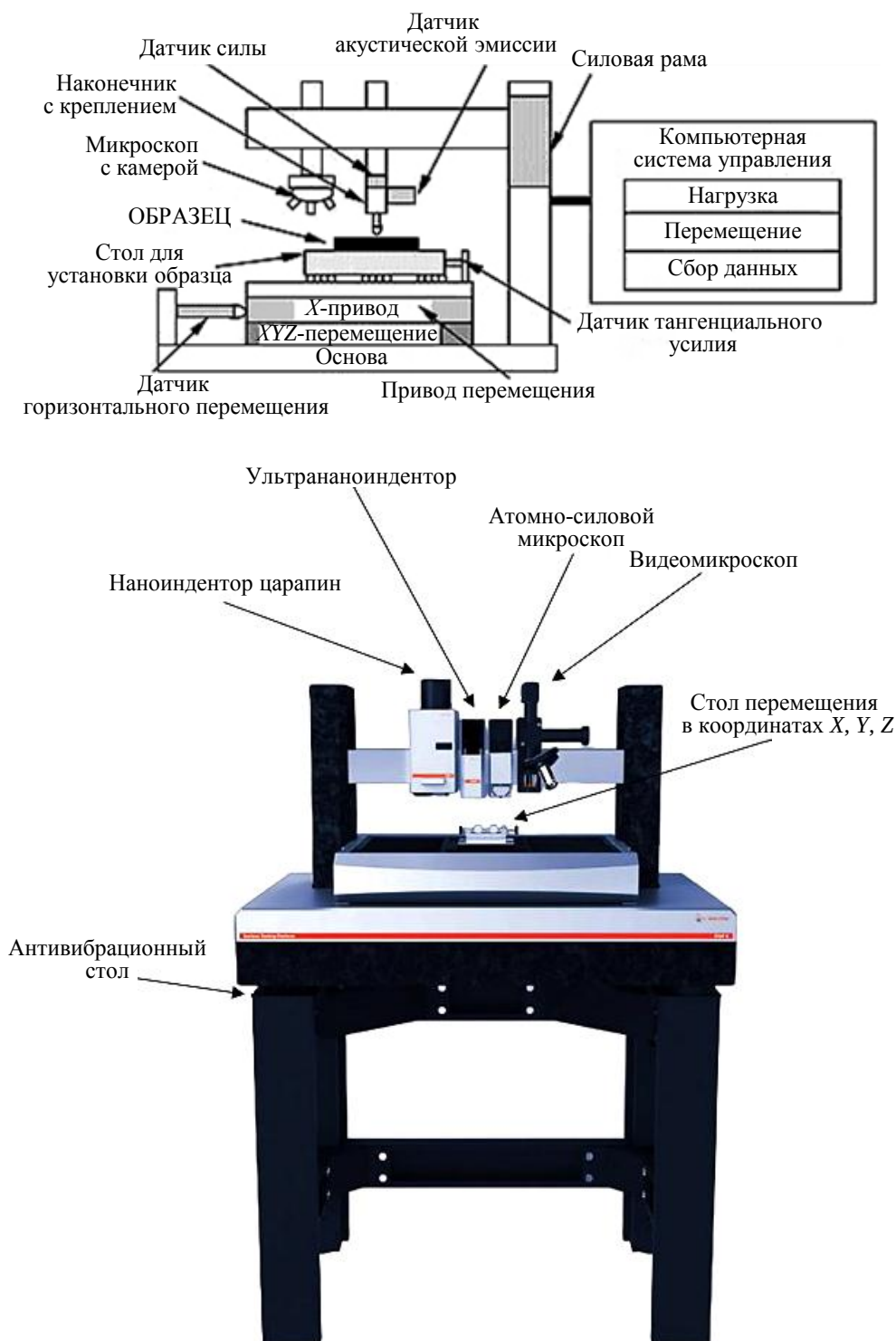


Рис. 7. Схема и внешний вид прецизионной универсальной испытательной машины малых размеров с компьютерным управлением нагружением исследуемого образца [40, 50]

Считается, что твердость является характеристикой сопротивления материалов малой упругопластической деформации. Однако развитие метода инструментального индентирования позволило проследить весь деформационный путь нагружения от упругой деформации до деформации разрушения. Большой вклад в развитие метода внесли отечественные материаловеды (Е.С. Беркович, С.И. Булычев, В.П. Алехин, А.П. Терновский, М.М. Хрущев, М.Х. Шоршоров и др.) [2, 3, 46]. Метод лежит в основе международных и отечественных стандартов [16, 18–28, 36–40]. В процессе инструментального индентирования у образца появляется новая свободная поверхность в результате пластической деформации и разрушения.

При измерении твердости методом царапания происходят не только упругая и пластическая деформации испытываемого материала, но и его местное разрушение. Твердость, определенная царапанием, связана с сопротивлением материала срезам. Диаграмма сдвига на рис. 6 демонстрирует вклады упругой и пластической частей деформации в напряжение среза. Упругая деформация вносит существенный вклад (не менее 50 %) в величину напряжения среза. Остальную часть определяет процесс реализации пластической деформации. Если упрочнения не происходит, то диаграмма сдвига имеет постоянную величину нагрузки P на участке развития пластической деформации, вклад пластической деформации незначителен, поэтому им можно пренебречь. В случае пластического упрочнения этот вклад необходимо учитывать.

Классические решения задачи внедрения индентора в упругое полупространство [2, 3, 17, 33, 41] показывают наличие в упругом теле мест, в которых должно возникать очень высокое напряжение (сингулярные контакты). В реальных материалах в этих местах появляется пластическая деформация и начинается разрушение. Напряженно-деформированное состояние материала под индентором и рядом с ним – объемное и зависит от формы индентора. На рис. 8 представлена схема внедрения инденторов разной формы в изотропный материал. Наиболее привлекательным индентором, при внедрении которого получают линейные зависимости на упругом участке $A_c(h)$, $P(h)$, $S(h)$, $p_m(h)$, является цилиндр с плоским дном. При появлении пластической деформации или среза на прямых $A_c(h)$, $P(h)$, $S(h)$, $p_m(h)$ должны возникнуть точки перелома. Напряжение среза можно определять по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = A p_m^n, \quad (5)$$

где A – постоянная материала; p_m^n – значение среднего контактного давления в точке перелома на прямых при минимальном значении нагрузки P_n .

После внедрения индентора проводят процесс царапания. Фиксируют глубину внедрения h , измеряют силу вдавливания P и горизонтальную силу P_T ,двигающую индентор. Можно царапать при фиксируемой или линейно возрастающей силе вдавливания P с замером глубины внедрения h и горизонтальной силы P_T [37]. На рис. 9 представлены типичные результаты испытания царапанием лакокрасочного покрытия. Микроскопия позволяет оценить и измерить следы царапания (рис. 10). Они могут быть результатом только пластической деформации, т. е. получены при вдавливании путем пластического деформирования материала без его отделения; результатом резания материала с отделением стружки или хрупкого разрушения с диспергированием и скалыванием материала. Наличие того или иного механизма царапания зависит не только от исследуемого материала, но и от величины нагрузки на индентор, формы и материала индентора, скорости нанесения царапины и др.

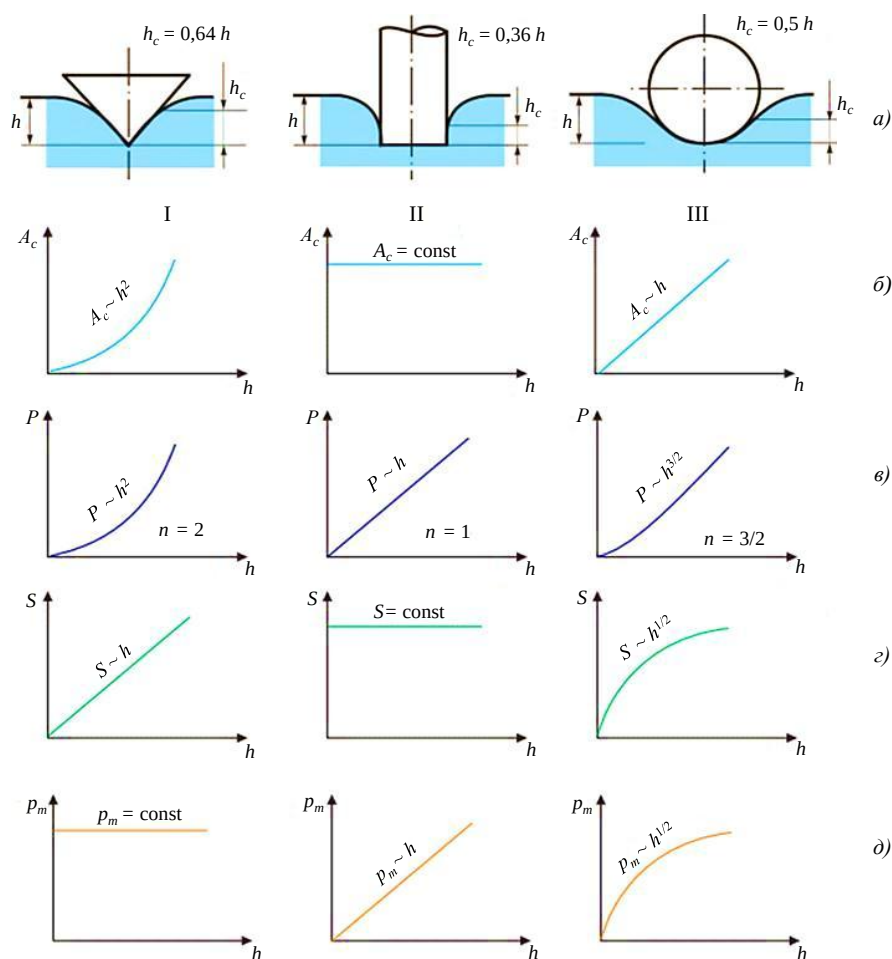


Рис. 8. Схема индентирования изотропного материала: I – острым конусом; II – цилиндром с плоским дном; III – сферой; а – сечение в плоскости симметрии пятна контакта; зависимости от глубины внедрения h площади контакта A_c (б); силы вдавливания P (в); контактной жесткости S (г) и среднего контактного давления p_m (д); h_c – контактная глубина [17]

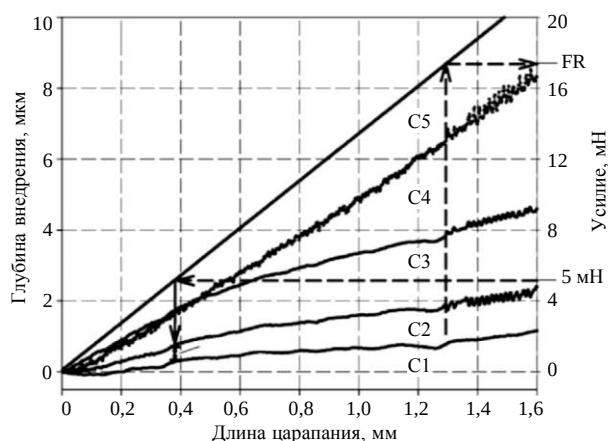


Рис. 9. Результаты испытания царапанием на наноинденторе: C1 – вертикальное перемещение слегка нагруженного индентора перед началом царапания с целью определения топографии поверхности образца; C2 – вертикальное перемещение слегка нагруженного индентора по следу от царапания; C3 – вертикальное перемещение нагружаемого индентора в процессе царапания; C4 – изменение горизонтальной силы в процессе царапания; C5 – управление вертикальной силой в процессе царапания [39]

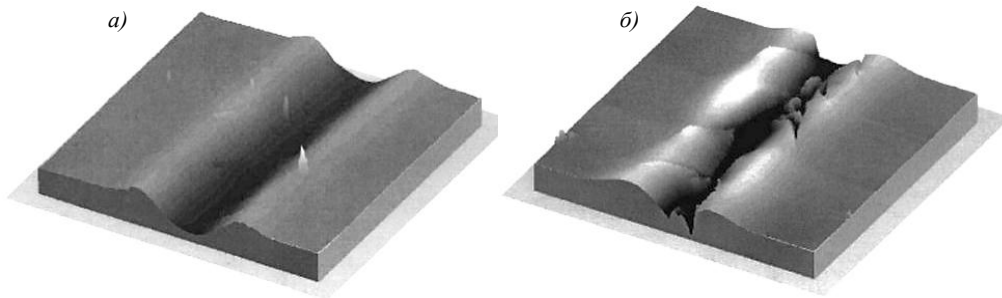


Рис. 10. Фотографии царапины без разрушения (а) и со следами разрушения на деформируемой поверхности (б) [39]

Напряжение среза следует определять при наличии механизма разрушения срезом по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = B P_{\Gamma}^{\max} / S, \quad (6)$$

где B – постоянная материала; $P_{\Gamma}^{\max}$ – максимальное значение горизонтальной силы; S – боковая контактная поверхность индентора, на которую действует сила $P_{\Gamma}^{\max}$.

Обсуждение и заключения

Обзор отечественных и зарубежных методик механических испытаний конструкционных авиационных композиционных материалов и покрытий на срез показал, что параллельно с развитием традиционных методик для испытаний металлических материалов появляются новые методики, базирующиеся на современных прецизионных универсальных испытательных машинах малых размеров с компьютерным управлением нагружением образца и регистрацией многочисленных изучаемых параметров. Машины позволяют проводить «мягкое» и «жесткое» нагружения. При испытании определяют коэффициент трения, характеристики шероховатости поверхности, инструментального индентирования и царапания, а также акустическую эмиссию; проводят оптическую и атомно-силовую микроскопию. Каждый показатель регистрируют с высокой (несколько тысяч герц) частотой и синхронизируют между собой [40, 50].

Использование индентора в виде цилиндра с плоским дном позволяет получать линейные зависимости характеристик индентирования от глубины внедрения, что упрощает определение напряжения среза.

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

Список источников

1. Лавров А.В., Ерасов В.С., Дьяченко О.А. Сравнительный анализ отечественной и зарубежных методик испытания на двойной срез болтов авиационного назначения // Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам: ежемесячное приложение к журналу «Все материалы. Энциклопедический справочник». 2013. № 11. С. 2–7.
2. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Механические испытания и свойства конструкционных авиационных металлических материалов: учебное пособие / под. общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. 344 с.
3. Методы испытаний контроля и исследования машиностроительных материалов: справ. пособие в 3 т. / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1974. Т. II: Методы исследования механических свойств металлов. С. 45–49.

4. ОСТ 1 31101–80. Болты, винты и шпильки. Технические условия М., 1980. 28 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
5. ОСТ 1 00552–72. Болты, винты из титанового сплава. Технические условия. М., 1972. 16 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
6. ОСТ 1 90148–74. Металлы. Метод испытания на срез. М., 1975. 8 с. URL: <https://standartgost.ru> (дата обращения: 16.07.2024).
7. MIL-STD-1312/13A. Fastener Test Methods. Method 13. Double Shear Test. Department of Defense of the USA. Washington. 1997. 10 p.
8. MIL-STD-1312-20. Fastener Test Method. Method 20. Single Shear. Aerospace Industries Association of America Inc., 1997. 14 p.
9. ASTM F606/F606M-2016. Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets. American Society for Testing and Materials, 2013. 19 p.
10. ASTM B565-04. Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods. American Society for Testing and Materials, 2015. 5 p.
11. ASTM B831-19. Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products. American Society for Testing and Materials, 2019. 5 p.
12. ГОСТ Р 57968–2017. Композиты полимерные. Метод испытания образцов на срез. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.
13. Устройство для испытаний пластмасс на срез: пат. RU 167675 U1 Рос. Федерация; заявл. 04.08.16; опубл. 10.01.17.
14. ASTM D732-17. Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool. American Society for Testing and Materials, 2010. 4 p.
15. Коновалов В.В. Методология аттестации конструкционных металлических материалов планера самолета // Труды ЦАГИ. 2013. Вып. 2725. С. 21–80.
16. ГОСТ 21318–75. Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. М.: Изд-во стандартов, 1976. 30 с.
17. Головин Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства материалов в субмикро- и наномасштабе. Недавние результаты и достижения (Обзор) // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. Вып. 1. С. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171.
18. ISO 14577-1:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method. International Organization for Standardization, 2015. 54 p.
19. ISO 14577-2:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines. International Organization for Standardization, 2015. 32 p.
20. ISO 14577-3:2015. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 3: Calibration of reference blocks. International Organization for Standardization, 2015. 16 p.
21. ISO 14577-4:2016. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings. International Organization for Standardization, 2016. 26 p.
22. ASTM D7027-20. Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine, American Society for Testing and Materials, 2020. 9 p.
23. ASTM E2546-15. Standard Practice for Instrumented Indentation Testing, American Society for Testing and Materials, 2023. 23 p.
24. ASTM G171-03. Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus, American Society for Testing and Materials, 2017. 7 p.
25. ГОСТ Р 56232–2014. Определение диаграммы «напряжение–деформация» методом инструментального индентирования шара. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.
26. ГОСТ Р 8.748–2011 (ИСО 14577-1:2002). Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2018. 28 с.

27. ГОСТ Р 8.904–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 2. Поверка и калибровка твердомеров. М.: Стандартиформ, 2018. 30 с.
28. ГОСТ Р 8.907–2015. Государственная поверочная схема для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования. М.: Стандартиформ, 2018. 8 с.
29. Марченков А.Ю., Терентьев Е.В. Масштабный эффект при испытаниях царапанием материалов с разным деформируемым объемом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 66–69.
30. Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н. и др. Склерометрический метод измерения микротвердости фоторезиста на кремнии // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 1. С. 77–84. DOI: 10.21122/2220-9506-7-1-77-84.
31. Львова Н.А., Кравчук К.С., Широков И.А. Алгоритмы обработки изображений царапин в методе склерометрии // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. Вып. 8. С. 1570–1577.
32. Усеинов А., Решетов В., Маслеников И., Кравчук К. ISO – это просто! // Наноиндустрия. 2015. № 7. С. 52–60.
33. Усеинов С.С. Измерение твердости конструкционных материалов методами индентирования и склерометрии на субмикронном и нанометровом масштабах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГУ ТИСНУМ, 2010. 27 с.
34. 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.jornal.viam.ru> (дата обращения: 17.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
35. 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.jornal.viam.ru> (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
36. EN 1071-3. Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coating – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test. European committee for standardization, 2005. 11 p.
37. ISO 20502-2005(E). Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing. International Organization for Standardization, 2005. 8 p.
38. ISO 1518-1:2023(E). Paints and varnishes – Determination of scratch resistance – Part 1: Constant-loading method. International Organization for Standardization, 2005. 6 p.
39. ASTM D7187-20. Standard Test Method for Measuring Mechanistic Aspects of Scratch/Mar Behavior of Paint Coatings by Nanoscratching, American Society for Testing and Materials, 2020. 12 p.
40. ASTM C1624-22. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, American Society for Testing and Materials, 2022. 28 p.
41. Снарский А.С., Крыленко А.В. Определение физико-механических характеристик материала методом неразрушающего контроля // Фундаментальные науки. Механика. 2005. № 10. С. 133–137.
42. Гоголинский К.В., Сясько В.А. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев. URL: <https://ntcexpert.ru/documents/metody-pokrytij.pdf?ysclid=lwkg18gy4p195748077> (дата обращения: 19.07.2024).
43. Головин Ю.И., Тюрин А.И. Нано- и микротвердость твердых тел – современные проблемы // Вестник ТГУ. 2000. Т. 5. Вып. 2–3. С. 251–253.
44. Беркович Е.С., Крапошина Л.Б. Новый прибор ИМАШ – глубиномер интерференционный – для испытания на микротвердость по глубине отпечатка // Новое в области испытаний на микротвердость. М.: Наука, 1974. С. 93–100.
45. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Уткин Д.А., Автаева Я.В. Оборудование для определения физико-механических характеристик материалов методом вдавливания (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-107-124.

46. 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: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
47. Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Гринчук П.С. Определение трещиностойкости с использованием АСМ // *Сб. докл. XIII Междунар. конф. «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии»*. Минск, 2018. С. 260–266.
48. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.jornal.viam.ru>. (дата обращения: 19.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
49. Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О., Гулина И.В. Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2023. Т. 29. № 3. С. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88.
50. Anton Paar Scratch Testers. URL: <http://www.anton-paar.com>. (дата обращения: 19.07.2024).

References

1. Lavrov A.V., Yerasov V.S., Dyachenko O.A. Comparative analysis of domestic and foreign methods of double shear testing of aviation bolts. *Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam: yezhemesyachnoye prilozheniye k zhurnalu «Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik»*, 2013, no. 11, pp. 2–7.
2. Erasov V.S., Oreshko E.I. *Mechanical testing and properties of structural aircraft metal materials: a tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2023, 344 p.
3. *Methods of testing, monitoring and research of engineering materials: a reference in 3 vols*. Ed. A.T. Tumanov. Moscow: Mashinostroenie, 1974, vol. II: Methods of studying mechanical properties of metals, pp. 45–49.
4. Industry standard 1 31101–80. *Bolts, screws and studs. Specifications*. Moscow, 1980, 28 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
5. Industry standard 1 00552–72. *Bolts, screws made of titanium alloy. Technical conditions*. Moscow, 1972, 16 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
6. Industry standard 1 90148–74. *Metals. Shear Test Method*. Moscow, 1975, 8 p. Available at: <https://standartgost.ru> (accessed: July 16, 2024).
7. MIL-STD-1312/13A. *Fastener Test Methods. Method 13. Double Shear Test*. Department of Defense of the USA. Washington. 1997, 10 p.
8. MIL-STD-1312-20. *Fastener Test Method. Method 20. Single Shear*. Aerospace Industries Association of America, Inc., 1997, 14 p.
9. ASTM F606/F606M-2016. *Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets*. American Society for Testing and Materials, 2013, 19 p.
10. ASTM B565-04. *Standard Test Method for Shear Testing of Aluminum and Aluminum-Alloy Rivets and Cold-Heading Wire and Rods*. American Society for Testing and Materials, 2015, 5 p.
11. ASTM B831-19. *Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*. American Society for Testing and Materials, 2019, 5 p.
12. State Standard R 57968–2017. *Polymer composites. Method for testing samples for shear*. Moscow: Standartinform, 2018, 15 p.
13. *Device for testing plastics for shear*: pat. RU 167675 U1 Russian Federation; appl. 04.08.16; publ. 10.01.17.
14. ASTM D732-17. *Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool*. American Society for Testing and Materials, 2010, 4 p.
15. Konovalov V.V. Methodology for certification of structural metal materials of aircraft airframes. *Trudy TSAGI*, 2013, is. 2725, pp. 21–80.
16. State Standard 21318–75. *Microhardness measurement by scratching with diamond tips*. Moscow: Publ. House of Standards, 1976, 30 p.

17. Golovin Yu.I. Nanoindentation and mechanical properties of materials at the submicro- and nanoscale. Recent results and achievements (Review). *Fizika tverdogo tela*, 2021, vol. 63, is. 1, pp. 3–42. DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171.
18. ISO 14577-1:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method*. International Organization for Standardization, 2015, 54 p.
19. ISO 14577-2:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 2: Verification and calibration of testing machines*. International Organization for Standardization, 2015, 32 p.
20. ISO 14577-3:2015. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 3: Calibration of reference blocks*. International Organization for Standardization, 2015, 16 p.
21. ISO 14577-4:2016. *Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 4: Test method for metallic and non-metallic coatings*. International Organization for Standardization, 2016, 26 p.
22. ASTM D7027-20. *Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine*. American Society for Testing and Materials, 2020, 9 p.
23. ASTM E2546-15. *Standard Practice for Instrumented Indentation Testing*. American Society for Testing and Materials, 2023, 23 p.
24. ASTM G171-03. *Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus*. American Society for Testing and Materials, 2017, 7 p.
25. State Standard R 56232–2014. *Determination of the stress-strain diagram by the instrumental indentation of a ball. General requirements*. Moscow: Standartinform, 2018, 41 p.
26. State Standard R 8.748–2011 (ISO 14577-1:2002). *State system for ensuring the uniformity of measurements. Metals and alloys. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 1. Test method*. Moscow: Standartinform, 2018, 28 p.
27. State Standard R 8.904–2015. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Measurement of hardness and other characteristics of materials by instrumental indentation. Part 2. Verification and calibration of hardness testers*. Moscow: Standartinform, 2018, 30 p.
28. State Standard R 8.907–2015. *State verification scheme for hardness measuring instruments according to the Martens and indentation scales*. Moscow: Standartinform, 2018, 8 p.
29. Marchenkov A.Yu., Terentyev E.V. Scale effect in scratch tests of materials with different deformable volumes. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 9, pp. 66–69.
30. Brinkevich D.I., Prosolovich V.S., Yankovsky Yu.N. et al. Sclerometric method for measuring the microhardness of photoresist on silicon. *Pribory i metody izmereniy*, 2016, vol. 7, no. 1. 77–84. DOI: 10.21122/2220-9506-7-1-77-84.
31. Lvova N.A., Kravchuk K.S., Shirokov I.A. Algorithms for processing scratch images in the sclerometry method. *Fizika tverdogo tela*, 2013, vol. 55, is. 8, pp. 1570–1577.
32. Useinov A., Reshetov V., Maslenikov I., Kravchuk K. ISO is easy! *Nanoindustriya*, 2015, no. 7, pp. 52–60.
33. Useinov S.S. *Measuring the hardness of structural materials by indentation and sclerometry methods on the submicron and nanometer scales*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: FGU TISNUM, 2010, 27 p.
34. 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: July 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-121-135.
35. 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: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
36. EN 1071-3. *Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coating – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by scratch test*. European committee for standardization, 2005, 11 p.

37. ISO 20502-2005(E). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of adhesion of ceramic coatings by scratch testing*. International Organization for Standardization, 2005, 8 p.
38. ISO 1518-1:2023(E). *Paints and varnishes – Determination of scratch resistance – Part 1: Constant-loading method*. International Organization for Standardization, 2005, 6 p.
39. ASTM D7187-20. *Standard Test Method for Measuring Mechanistic Aspects of Scratch/Mar Behavior of Paint Coatings by Nanoscratching*. American Society for Testing and Materials, 2020, 12 p.
40. ASTM C1624-22. *Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing*. American Society for Testing and Materials, 2022, 28 p.
41. Snarsky A.S., Krylenko A.V. Determination of physical and mechanical characteristics of a material by non-destructive testing. *Fundamentalnye nauki. Mekhanika*, 2005, no. 10, pp. 133–137.
42. Gogolinsky K.V., Syasko V.A. *Methods and means for monitoring mechanical properties of micro- and nanometer coatings and modified surface layers*. Available at: <https://ntcexpert.ru/documents/metody-pokrytij.pdf?ysclid=lwkg18gy4p195748077> (accessed: July 19, 2024).
43. Golovin Yu.I., Tyurin A.I. Nano- and microhardness of solids – modern problems. *Vestnik TGU*, 2000, vol. 5, is. 2–3, pp. 251–253.
44. Berkovich E.S., Kraposhina L.B. New IMASH device – interference depth gauge – for testing microhardness by indentation depth. *New in the field of microhardness testing*. Moscow: Nauka, 1974, pp. 93–100.
45. Oreshko E.I., Erasov V.S., Utkin D.A., Avtayeve Ya.V. The equipment for definition of physicomaterial characteristics of materials by press-in method (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-107-124.
46. 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: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
47. Lapitskaya V.A., Kuznetsova T.A., Chizhik S.A., Grinchuk P.S. Determination of crack resistance using AFM. *Reports XIII Int. Conf. «Methodological aspects of scanning probe microscopy»*. Minsk, 2018, pp. 260–266.
48. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
49. Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O., Gulina I.V. Application of the digital image correlation method for constructing deformation diagrams in true coordinates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2023, vol. 29, no. 3, pp. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88.
50. Anton Paar Scratch Testers. Available at: <http://www.anton-paar.com> (accessed: July 19, 2024).

Информация об авторах

Ерасов Владимир Сергеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибяев Илья Гоярович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сутубалов Александр Игоревич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Vladimir S. Erasov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya G. Sibayev, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Sutubalov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.10.2024.

The article was submitted 11.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.10.2024.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Всероссийский научно-исследовательский институт
авиационных материалов



НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ВИАМ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



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

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

25 высокотехнологичных
наукоемких производств по выпуску
253 наименований материалов
и полуфабрикатов

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

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



национальная
система
аккредитации
инфраструктура
доверия



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



Разработка технологий и производство
полуфабрикатов и изделий из ПКМ.

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



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

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



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

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

на правах рекламы

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





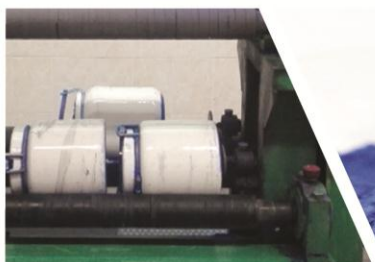
МОДИФИКАТОР АЛЮМИНАТ КОБАЛЬТА МАРОК АК-1, АК-2, АК-3 ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОЙ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МАКРОСТРУКТУРЫ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

**СОДЕРЖАНИЕ СВОБОДНОГО КОБАЛЬТА
В МОДИФИКАТОРЕ – МЕНЕЕ 2%,
ЧТО ПОЗВОЛЯЕТ ИСКЛЮЧИТЬ
ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
С РАСПЛАВЛЕННЫМ МЕТАЛЛОМ
И ПОЛУЧИТЬ ОТЛИВКУ БЕЗ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ.**

При производстве алюмината кобальта марок АК-1, АК-2, АК-3 используются исходные материалы с низким содержанием щелочных металлов, что приводит к увеличению живучести суспензии при изготовлении керамических оболочковых форм.

Производственные мощности

3 000 кг алюмината кобальта
в год



Лопатка, полученная
без модификатора
(А)
и с модификатором
(Б)

Показатели	Значения показателей алюмината кобальта марки		
	АК-1	АК-2	АК-3
Массовая доля свободного кобальта, % (не более)	2	2	2
Удельная поверхность, см ² /г	4500–6500	8000–10000	10000–12000

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЮМИНАТА КОБАЛЬТА ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- повышение плотности;
- снижение ликвационной неоднородности;
- измельчение макрозерна и фрагментов микроструктуры металла отливок.

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

на правах рекламы

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



АЛЮМИНИЕВЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ
И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ НИХ, СЛОИСТЫХ
АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ (СИАЛ)**

Сопровождение промышленного производства, решение научных и технических задач в области материаловедения алюминиевых сплавов.

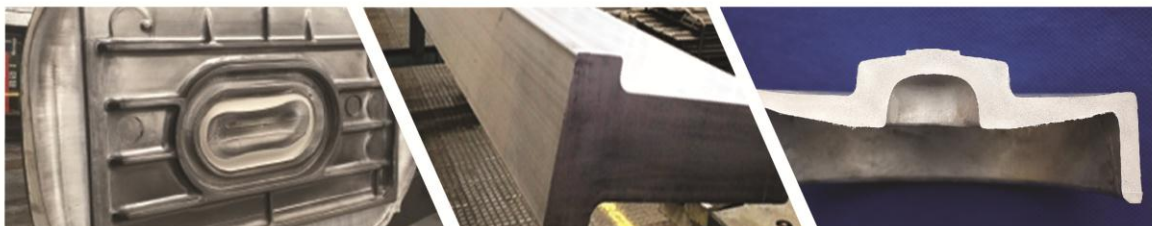
Термическая обработка полуфабрикатов
и деталей из алюминиевых сплавов

до **30 000 кг** заготовок деталей
в год

Металлографический анализ структуры
алюминиевых сплавов

300 шт. образцов
в год

Полуфабрикаты из новых алюминиевых деформируемых сплавов



Гибридные материалы на основе листов алюминия



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- разработку и технологическое сопровождение производства алюминиевых деформируемых сплавов и слоистых алюмо-стеклопластиков (СИАЛ);
- проведение работ по выявлению причин разрушения изделий и производственного брака полуфабрикатов из алюминиевых деформируемых сплавов;
- проведение термической обработки алюминиевых сплавов.

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

на правах рекламы

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



ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ВЫСОКОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЕ



Производственные
мощности:

60 000 м² углеродных тканей
в год

9 пропиточных линий

350 000 м² препрегов
в год

90 000 кг связующих
в год



В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны углепластики, стеклопластики и органопластики с рабочей температурой от -60 до +350°C.



Разработанные материалы применяются в различных изделиях авиационного назначения.

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- углеродные ткани – ВТкУ-2.200, ВТкУ-2.280, ВТкУ-2.200Т, ВТкУ-3;
- углепластики – ВКУ-39/ВТкУ-2.200, ВКУ-39/ВТкУ-2.280, ВКУ-29/ВТкУ-3, ВКУ-28/SYT55(S), ВКУ-25/SYT49S, ВКУ-30K.UMT49, ВКУ-30K.SYT49(S), ВКУ-57, ВКУ-45Ж/UMT-12K.ОЖН, ВКУ-45/UMT-3K.PTH, ВСП-3M/SYT55(S)-12K, ВСП-3M/ВТкУ-2.280, КМУ-11-M-2.200, ВКУ-38ТР, ВКУ-38ЖН;
- стеклопластики – ВПС-48/7781, ВПС-48/120, серия КМКС-2м. и КМКС-4, ВПС-53/120, ВПС-53/Т-25, ВСП-3М/Т-25, ВПС-31, ВПС-47/7781, ВПС-59/290, ВПС-42ПТ-64, ВПС-39П, СТ-69Н;
- органопластики – Органит 11ТЛ, Органит 12Т(М), ВКО-20, ВКО-2ТБ, Оргалон АФ-1М;
- гибридные материалы – ВКГ-5, ВСП-3М/ВБМПН-10-400/SYT45-3К.

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

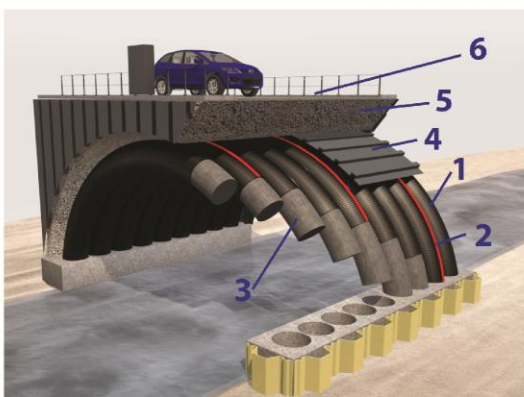
на правах рекламы

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

**РАЗРАБОТАНЫ И РЕАЛИЗОВАНЫ
В КОНСТРУКЦИЯХ ПОЛИМЕРНЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ГРАЖДАНСКИХ ОТРАСЛЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**



БЫСТРОВОЗВОДИМЫЙ МОСТ



- 1 – арочные элементы (углепластик ВКУ-51);
- 2 – датчики контроля напряженно-деформированного состояния на базе информкомпозитов;
- 3 – бетон;
- 4 – профнастил (стеклопластик ВПС-58);
- 5 – песчано-гравийная смесь;
- 6 – дорожное покрытие.



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- углеродные ткани – ВТКУ-2.200, ВТКУ-2.280, ВТКУ-2.200Т, ВТКУ-3;
- строительство быстровозводимых мостов с применением арочных оболочек из углепластика и листов профилированного настила до 20 м в соответствии с проектной документацией на мост «под ключ»;
- систему мониторинга мостового сооружения «под ключ» (ТУ26.51-014-07545412–2017) для отслеживания нагружения в режиме «реального времени»;
- лицензию на изготовление связующего ВСВ-43, арочных элементов из ВКУ-51, профнастила из ВПС-58;
- системы мониторинга.

ПКМ ДЛЯ СИЛОВЫХ СБОРОК



ПРЕИМУЩЕСТВА ИЗДЕЛИЙ:

- класс горючести – трудногорючие;
- водопоглощение 0,1%;
- высокая стойкость к агрессивным средам и коррозии.

МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- эпоксидное связующее ВСЭ-39 (пултрузия/инфузия);
- стеклопластик ВПС-61;
- опорные плиты;
- углепластик ВКУ-49;
- электроизолирующие стяжки.

МАССА ИЗДЕЛИЯ
СНИЖЕНА НА

35%
(С 80 ДО 50 КГ)



ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ, РЕЗИН
И ПОЛИМЕРНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
И ОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.
ВЕДЕТСЯ РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУР
ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ
ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ

Производственные
мощности

5 000 кг полисульфидных
герметиков
в год
20 000 кг силиконовых
герметиков
в год

10 000 кг полимерных
теплозащитных
и огнезащитных
материалов
в год



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- тиоколовые герметики: ВЭР-1, ВИТЭФ-1Б, ВИТЭФ-2НТ, ВТК-1-29, ВГМ-Л;
- силиконовые герметики: ВИКСИНТ КТМ, Пеногерметик ВПГ-300М, ВИКСИНТ У-20-92, ВИКСИНТ У-20-99, ВГМ-Л-3;
- полимерные теплозащитные и огнезащитные материалы: 1-ВШ, ВШ-4, ВЗО-9, ВЗО-9Х, ВОЗП-4, ВШ-РС-1, ТЗР-5М, ВТИ-3, ВШ-27Ф;
- теплоаккумулирующие материалы: В-ТАМ-50, ВТА-55, В-ТАМ-80, В-ТАМ-130;
- резина: ВР-38М, ВР-42;
- профилактические составы: ВИПС-1.

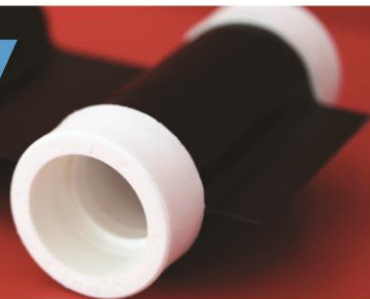
Россия, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
Телефон: +7 (499) 261-86-77, факс: +7 (499) 267-86-09

на правах рекламы

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

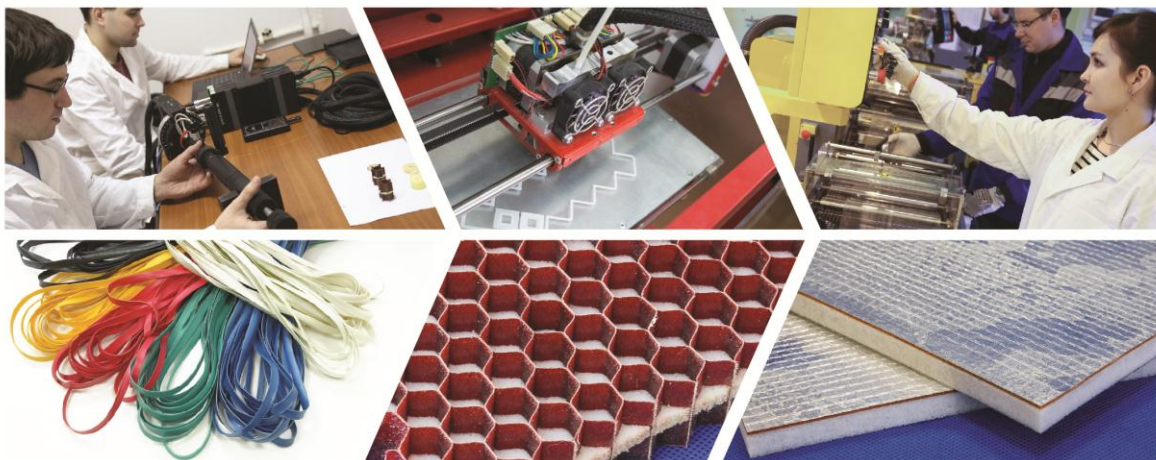
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

**ВЫПУСКАЕТСЯ ШИРОКАЯ НОМЕНКЛАТУРА
СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ
И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**



**Производственные
мощности**

до 5 000 кг	литьевых термопластов в год	5 000 м ²	тканепленочных материалов в год
500 кг	вибропоглощающих материалов в год	750 м ²	акустических материалов в год
200 кг	термопластичных композиций для 3D-печати в год	2 250 м ²	ССП покрытия в год
до 5 000 кг	полировочных и шлифовальных паст в год		



МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- литьевые термопласты и термозластопласты марок: ПК-М-2, ВТП-1-Л, ВТП-5, ВТП-7, ПА-12-Л, ВТЭП-1-Л, ВТЭП-3-Л, ВТП-12;
- термопластичные ПКМ марок: КТМС-1П, ВПС-38-Т, ВКУ-65, ВКУ-71;
- термопластичные композиции для 3D печати: ВТП-9, филамент на основе ПА-12Л, филамент на основе ПЭЭК;
- полировочная паста ВИАМ-3;
- шлифовальная паста М-20;
- вибропоглощающие материалы: ВТП-1В, ВТП-2В, ВТП-3В;
- звукопоглощающие материал-конструкция марки ВЗМК-1 и композиционная декоративная панель марки ВТИ-26;
- тканепленочные материалы марок: ВРТ-9, ВРТ-10, ВРТ-11, ВРТ-12, Полиплекс;
- пенопласты: ВПП-1, ВПП-5, ВПП-5/1.

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

на правах рекламы

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

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУФАБРИКАТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ



Испытательный центр
НИИЦ «Курчатовский
институт» – ВИАМ
включает в себя:

>700 единиц испытательного
оборудования

>1000 видов исследований
и испытаний

>400 единиц исследовательского
оборудования



Испытательный центр аккредитован Федеральным
агентством воздушного транспорта (Росавиация)
в качестве технического компетентного
испытательного центра



Испытательный центр аккредитован в национальной системе
аккредитации (Росаккредитация)

Испытательный центр аттестован филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ»
Минобороны России в качестве испытательного подразделения,
соответствующего требованиям к технической компетентности
и независимости, предъявляемым в руководящем документе
РД В 319.02.70-08 «Аппаратура, приборы, устройства военного
назначения. Требования к испытательным подразделениям
и порядок их аттестации» (включая ГОСТ ISO/IEC 17025–2019
«Общие требования к компетентности испытательных
и калибровочных лабораторий»)



Техническая компетенция Испытательного центра
признана Российским морским регистром судоходства

ИЦ ПРЕДЛАГАЕТ:

- физико-механические испытания;
- спектральные, химико-аналитические исследования;
- разработку и поставку стандартных образцов материалов;
- исследования теплофизических свойств;
- исследования методами неразрушающего контроля;
- исследования на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность;
- металлофизические исследования;
- проведение натурных климатических испытаний в климатических зонах:
 - умеренно теплый климат с мягкой зимой (РФ, г. Геленджик);
 - умеренный климат (РФ, г. Москва);
 - тропический климат (Республика Куба);
 - тропический сухой климат (Исламская Республика Иран);
 - влажный тропический климат (Китайская Народная Республика).

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

на правах рекламы

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



ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСИ СТАТЬИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ИЗДАНИЮ

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

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

3. Рукопись должна быть подписана всеми авторами статьи.

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

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

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

7. Рекомендуются следующая структура рукописи:

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

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

9. Основные технические параметры рукописи:

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

10. Форма подачи рукописи:

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

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

Список литературы должен включать не менее 15 источников.

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

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

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

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

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

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

ТРУДЫ ВИАМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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