

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-64-81

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАРАНТИЙНОГО СРОКА ХРАНЕНИЯ ПРЕПРЕГА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛИИМИДНОГО УГЛЕПЛАСТИКА

М.И. Валуева¹, И.В. Зеленина¹, А.В. Начаркина¹, А.С. Бойчук¹

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

Аннотация. Исследовано влияние условий и продолжительности хранения на характеристики препрега на основе расплавленного термореактивного полиимидного связующего марки ВС-51 и высокотемпературного углепластика на его основе. Определен гарантийный срок хранения препрега в диапазоне температур от $-(18\pm 5)$ до $+(20\pm 5)$ °С. Полиимидное связующее, армирующий углеродный наполнитель, препрег и углепластик изготовлены на технологической базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, высокотемпературные углепластики, полиимидное связующее, препреги, условия хранения, гарантийный срок хранения

Для цитирования: Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Бойчук А.С. Определение гарантийного срока хранения препрега высокотемпературного полиимидного углепластика // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-64-81.

Scientific article

DETERMINATION OF THE GUARANTEED SHELF LIFE OF HIGH-TEMPERATURE POLYIMIDE CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC PREPREG

M.I. Valueva¹, I.V. Zelenina¹, A.V. Nacharkina¹, A.S. Boychuk¹

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

Annotation: The influence of conditions and duration of storage on the characteristics of a prepreg based on a melted thermosetting polyimide binder grade VS-51 and high-temperature carbon fiber reinforced plastic based on it are studied. In accordance with the data obtained, the guaranteed shelf life of the prepreg was determined in the temperature range from $-(18\pm 5)$ to $+(20\pm 5)$ °C. The binder, reinforcing carbon filler, prepreg and carbon fiber reinforced plastics were manufactured at the technological base of the NRC «Kurchatov Institute» – VIAM.

Keywords: polymer composite materials, high-temperature carbon fiber reinforced plastics, polyimide binder, prepregs, storage conditions, guaranteed shelf life

For citation: Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Boychuk A.S. Determination of the guaranteed shelf life of high-temperature polyimide carbon fiber reinforced plastic prepreg. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-64-81.

Введение

Для изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) применяются различные компоненты и технологические решения, выбираемые в зависимости от поставленных задач. Современное производство элементов конструкций из ПКМ в значительной степени ориентируется на препреговую технологию [1–7].

Препрег представляет собой материал-полуфабрикат, получаемый пропиткой армирующей волокнистой основы (лент, жгутов, тканей) дозированным количеством равномерно распределенного полимерного связующего. Полученные таким образом большие листы или рулоны готового к переработке материала позволяют выпускать крупногабаритные изделия различной формы. Препрег, изготовленный на специальных пропиточных установках, характеризуется высоким качеством пропитки наполнителя связующим, минимальными механическими повреждениями наполнителя, равномерным «наносом» связующего при оптимальном процентном содержании связующего в препреге. При использовании расплавных связующих количество растворителя минимизировано, что обеспечивает получение ПКМ с низкой пористостью и экологичность их производства. Использование современных автоматизированных линий позволяет добиться содержания связующего в препрегах с разбросом, не превышающим $\pm 3\%$, что достигается точностью выставления зазоров между валами пропиточной машины. Применение препрега с минимальной липкостью позволяет автоматизировать процесс его переработки методами намотки и выкладки, сделать технологически «чистыми» процессы ручной выкладки сложных изделий, проводить автоматизированный раскрой препрега на станках с программным управлением [8–14].

В настоящее время остаются актуальными исследования, направленные на совершенствование сложного и многостадийного технологического процесса изготовления препрегов и повышение их качества. Так, представленная в работе [15] система управления позволяет добиться стабильных показателей качества препрега за счет снижения до 2 % отклонений температур предварительной подсушки армирующего наполнителя и термической обработки препрега на узлах пропиточной машины.

При разработке препрега важным параметром является его срок годности в различных условиях. Гарантийным принято считать срок хранения, в течение которого изготовленные заранее полуфабрикаты хранятся без ухудшения технологических характеристик. В зависимости от вида применяемого полимерного связующего и условий хранения препрега технологичность промышленно выпускаемых препрегов может сохраняться от 10 сут до 12 мес [8, 9]. Минимальный срок годности препрега должен быть не менее 14 дней, что необходимо для его переработки в условиях цеха. Как правило, максимально возможный срок хранения обеспечивается в условиях морозильной камеры при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом важным фактором является обеспечение герметичности упаковки препрега во избежание попадания конденсационной влаги [16].

Ухудшение характеристик ПКМ имеет сложную физико-химическую природу и может быть связано с самопроизвольным отверждением, испарением летучих веществ, сорбцией влаги и т. д. Основной причиной изменения свойств препрегов при хранении является протекание в полимерном связующем химических реакций, скорость которых зависит от температуры хранения. В процессе хранения контролируют изменение реакционной способности и технологических свойств препрегов, таких как содержание связующего, летучих веществ; липкость и др., а также исследуют ПКМ, получаемые на основе препрега. Критерии оценки качества препрегов выбирают в процессе разработки материала, в ходе которой определяют перечень нормированных показателей его качества [17–19].

В связи с этим одной из практически значимых задач, решаемых исследователями, является разработка препрегов с увеличенным сроком годности, предназначенных

для получения ПКМ различного назначения. Например, в работе [20] показано, что увеличению срока хранения препрега может способствовать пространственное разделение функциональных групп отвердителя и олигомера при отдельном нанесении компонентов или введение «барьерного» полимера, замедляющего диффузионные процессы.

Наиболее часто жизнеспособность связующих отождествляют с временем гелеобразования, в момент которого они теряют текучесть, в результате чего резко снижается их способность к дальнейшей переработке. Максимальное время гелеобразования является верхним пределом жизнеспособности полимерной композиции и зависит от процесса структурирования полимера с образованием сетки связей. На практике препреги теряют способность к переработке задолго до достижения верхнего предела жизнеспособности из-за существенного повышения вязкости связующего вплоть до перехода в стеклообразное состояние.

В работе [19] исследованы свойства препрега электропроводящего покрытия на основе полициануратного связующего ВСЦ-14 с добавлением наномодификаторов (астраленов и терморасширенного графита) и углеродной ткани. Температуру стеклования (T_c) препрега определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии. При значениях T_c ниже оптимального диапазона (от -15 до $+2$ °С) препрег может обладать чрезмерной липкостью, а при значениях выше – связующее в препреге близко к охрупчиванию с последующим осыпанием. Установленный по результатам исследования срок хранения при температуре от -8 до $+5$ °С составил: для препрега без добавок – до 8 мес, для препрега с наночастицами: астралена – до 5 мес, терморасширенного графита – до 1 мес.

При определении срока годности препрега на основе фенолформальдегидного связующего ВСФ-16М и стеклоткани использованы различные методы [17]. Исследованы параметры отверждения (методом дифференциальной сканирующей калориметрии) и время гелеобразования связующего в препреге (ультразвуковым методом) после хранения в условиях цеха ($1-4$ мес при температуре 20 ± 2 °С) и холодильной камеры ($1-6$ мес при температуре 3 ± 2 °С). Показано, что время гелеобразования связующего в процессе хранения сокращается: в холодильной камере в течение 6 мес – незначительно (с 57 до 43 мин); в условиях цеха в течение 4 мес – с 57 до 17 мин. Тепловой эффект реакции отверждения также снижается и зависит от условий хранения (рис. 1).

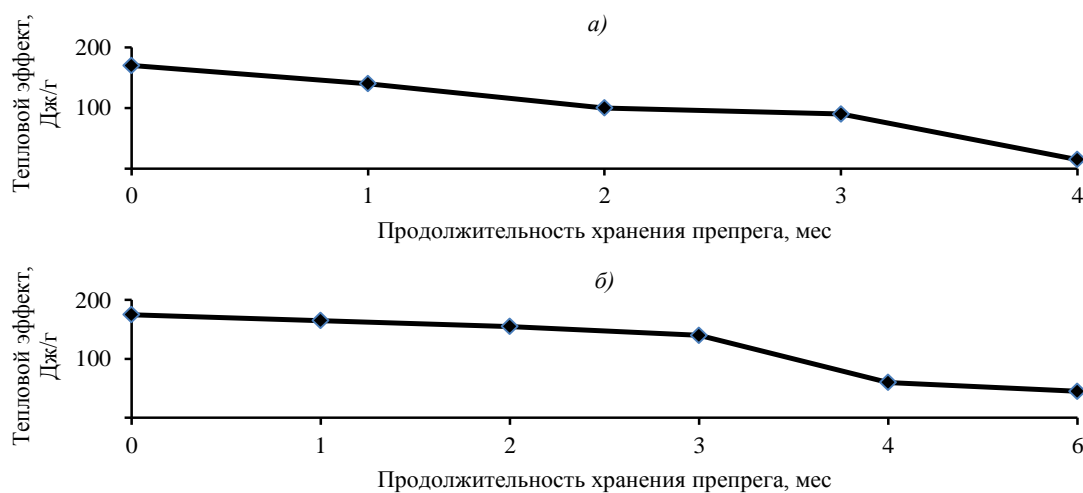


Рис. 1. Влияние условий и сроков хранения на тепловой эффект реакции отверждения связующего ВСФ-16М в составе препрега [17]: *а* – в условиях цеха; *б* – в условиях холодильной камеры

Резкое изменение теплового эффекта для препрега, хранившегося в условиях холодильной камеры, начинается после 4 мес, а для препрега, хранившегося в условиях цеха, – уже после 2 мес. Данные по реакционной активности препрегов при хранении в сочетании с исследованием физических и механических свойств ПКМ позволяют определить гарантийные сроки хранения препрега [21].

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований является разработка высокотемпературных ПКМ, предназначенных для применения в составе теплонагруженных конструкций. К таким материалам относятся ПКМ на основе полиимидных связующих типа PMR. Наиболее распространенные полиимидные связующие для изготовления препрегов используют в виде растворов, где в качестве растворителей выступают достаточно агрессивные и химически небезопасные соединения. Гарантийный срок хранения таких препрегов определяют разработчики. Особенности процессов отверждения полиимидных связующих не позволяют использовать стандартные методы термического анализа, широко применяемые при исследовании традиционных терморезактивных связующих (эпоксидных, фенольных и др.) [22–28].

В работе [29] исследовано влияние хранения препрегов на основе растворных полиимидных связующих типа PMR и углеродных наполнителей: тканого – из углеродного волокна Thornel T-300 3K (фирма Union Carbide's) и однонаправленного – в виде углеродного жгута A-S 10K (фирма Hercules Inc.). В зависимости от условий хранения получены следующие результаты:

- при температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 12 мес для препрегов на основе связующего PMR-15/T-300 изменений не зафиксировано;
- при температуре $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 9 мес в препреге на основе связующего PMR-15/A-S внешний (поверхностный) слой в рулоне «приплавился» к смежному слою бумаги, что свидетельствует о непригодности данного материала для дальнейшего использования;
- при температуре $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ через 2 мес препрег на основе связующего PMR-II/A-S был годен.

В работе [30] показано, что на срок годности полиимидных связующих могут существенно влиять входящие в их состав растворители: метанол, изопропанол и др. (рис. 2).

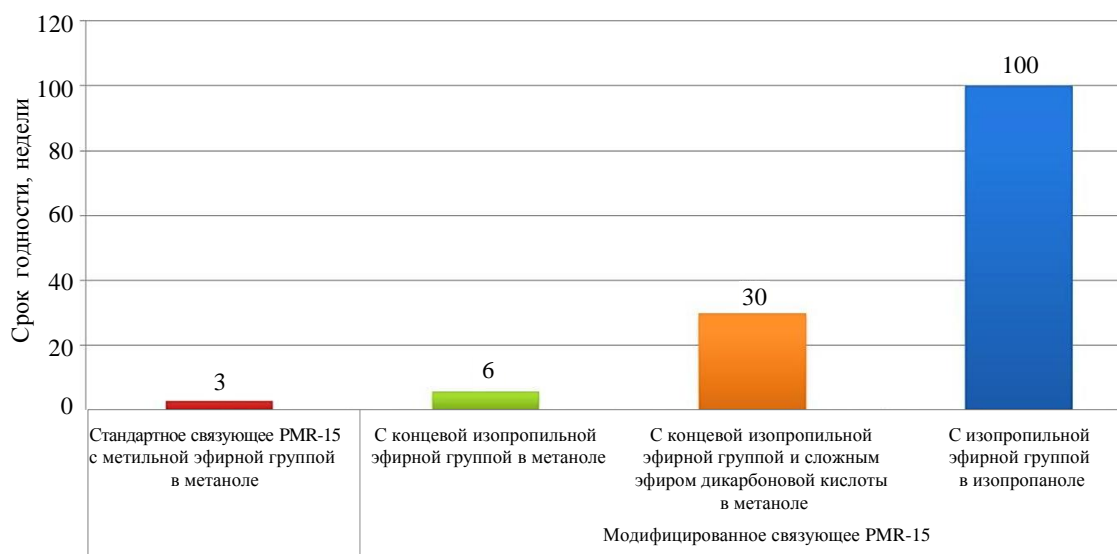


Рис. 2. Срок хранения полиимидных связующих типа PMR-15 в зависимости от состава и используемого растворителя [30]

В табл. 1 приведены сроки годности наиболее широко применяемых современных терморезактивных полиимидных связующих и препрегов на их основе, выпускаемых зарубежными производителями.

Таблица 1

Сроки годности промышленно выпускаемых за рубежом терморезактивных полиимидных связующих и препрегов на их основе [31–36]

Связующее (производитель)	Срок годности при температуре хранения	
	–18 °С	21–25 °С
Avimid [®] R, Avimid [®] RB (Cytec Solvay)	12 мес	14 дней
Cycom [®] 2237 (Cytec Solvay)	12 мес	Н/д
RS-51 (Toray Advanced Composite)	6 мес	10 дней
TC890 (Toray Advanced Composite)	12 мес	14–30 дней
PETI-365E (Ube Industries Ltd.)	3 мес	Н/д
Примечание. Н/д – нет данных.		

В данной статье представлены результаты определения гарантийного срока хранения препрега высокотемпературного углепластика на основе расплавленного терморезактивного полиимидного связующего ВС-51 разработки и производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [37].

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

Материалы и методы

Объектом исследования в данной работе являлся препрег высокотемпературного углепластика на основе расплавленного терморезактивного полиимидного связующего ВС-51 и равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-2.200 с поверхностной плотностью 200 г/м², а также углепластик на основе данного препрега (рис. 3).

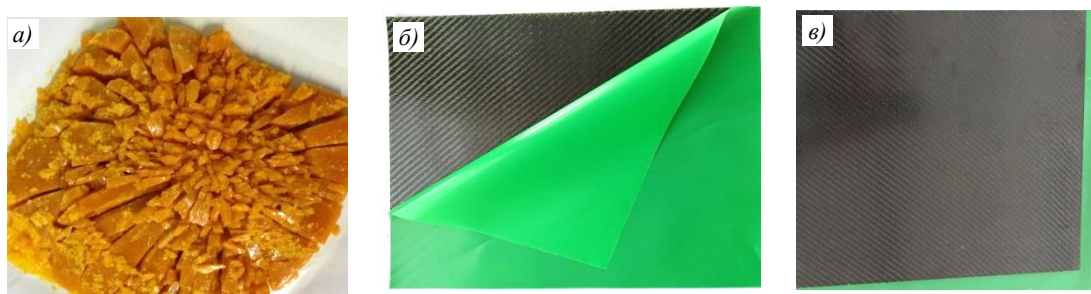


Рис. 3. Связующее ВС-51 (а), препрег (б) и углепластик (в) на его основе

Препрег получали на автоматизированной пропиточной установке. Плиты углепластика изготавливали отверждением в высокотемпературном автоклаве, оснащённом азотной станцией, с последующим постотверждением в термошкафу в среде кислорода воздуха. Образцы углепластика получали на отрезном и фрезерно-гравировальном станках.

Препреги хранили в различных условиях:

- в помещении при температуре 20±5 °С;
- в холодильной камере при температуре 0–5 °С;
- в морозильной камере при температуре –(18±5) °С.

После хранения в указанных условиях исследовали свойства препрега и углепластика на его основе.

В препреге массовую долю связующего и содержание растворимой смолы определяли по ГОСТ Р 56796–2015, содержание летучих веществ – по ГОСТ Р 56789–2015 (при температуре 170 °С в течение 15 мин), текучесть смолы – по ГОСТ 32660–2014 (при температуре 175 °С и давлении 0,7 МПа в течение 30 мин).

Для углепластика содержание связующего и толщину монослоя определяли по ГОСТ Р 56682–2015 (метод II), плотность – по ГОСТ 15139–69 (метод гидростатического взвешивания), температуру стеклования – по ГОСТ Р 56753–2015, прочность и модуль упругости при растяжении – по ГОСТ Р 56785–2015, прочность при сжатии – по ГОСТ Р 56812–2015, прочность и модуль упругости при статическом изгибе – по ГОСТ Р 56805–2015.

Реологические характеристики связующего в препреге определяли методом термомеханического анализа при воздействии на образец сжимающей нагрузки с переменной частотой 1 Гц в интервале температур от 20 до 300 °С в динамической воздушной среде при скорости продувки 50 мл/мин.

Наличие крупных несплошностей (дефектов) в отформованных плитах определяли методом неразрушающего контроля – ультразвуковым эхо-импульсным методом на автоматизированной ультразвуковой иммерсионной установке. Плиты сканировали с использованием фокусированного иммерсионного преобразователя с центральной частотой 5 МГц, диаметром пьезопластины 0,5 дюйма и фокусным расстоянием 1,5 дюйма. Исследования проводили при чувствительности, эквивалентной выявлению искусственного отражателя диаметром 5 мм. Для дополнительного анализа результаты сканирования записывали в виде *S*-сканов по величине амплитуды эхо-сигналов, отраженных от донной поверхности плиты, – донных эхо-сигналов (рис. 4).

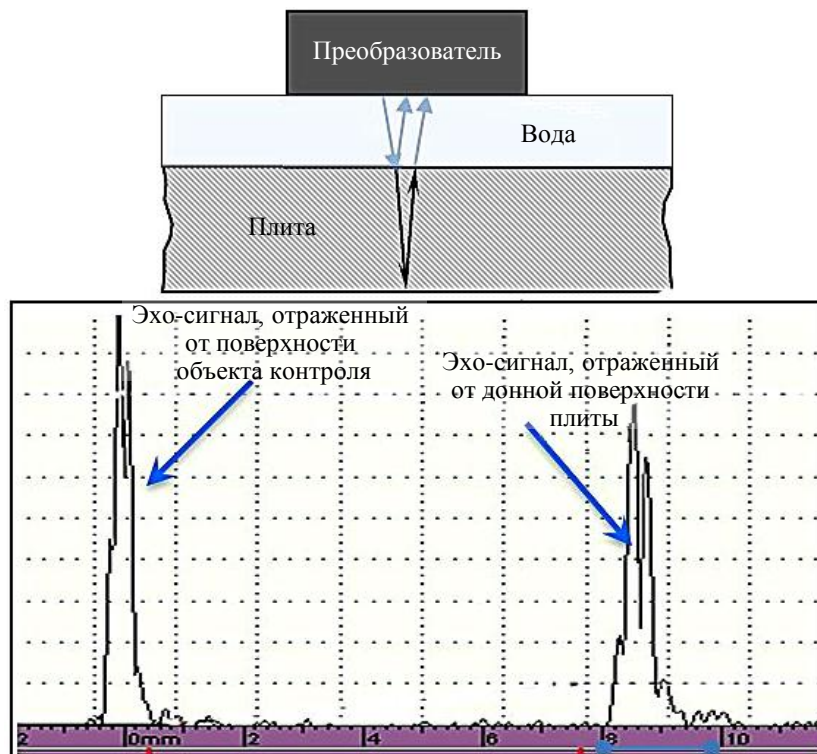


Рис. 4. Отображение донного эхо-сигнала на экране дефектоскопа

Результаты и обсуждение

По техническим условиям гарантийный срок хранения полиимидного связующего ВС-51 составляет: 6 мес при температуре не выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; не менее 3 мес при температуре от -10 до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако сроки хранения связующего в составе препрега могут отличаться от сроков хранения, заявленных в технических условиях. Это связано с рядом факторов, одним из которых является разогрев связующего – как предварительный перед пропиткой (при температуре $50\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$), так и в процессе пропитки (при перемешивании в коутере, на нагревательных плитах и обогреваемых ламинаторах при температурах до $115\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для оценки сроков хранения препрегов на основе традиционных термореактивных связующих (эпоксидные, фенольные, цианэфирные, бисмалеинимидные и т. д.) можно использовать такие методы, как термический анализ, определение изменения липкости, физических свойств препрегов и углепластиков на их основе. Однако применение термических методов анализа, в частности дифференциальной сканирующей калориметрии, для оценки качества препрега на основе полиимидного связующего ВС-51 затруднено из-за специфики отверждения, поэтому в первую очередь исследованы его технологические свойства.

Для выявления наиболее чувствительной характеристики проведено ускоренное старение препрега: образцы термостатировали при повышенной температуре ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$) в течение 8, 13, 18 и 23 ч. Свойства препрега определяли после каждого периода выдержки (табл. 2).

Таблица 2

Технологические свойства (средние значения) препрега углепластика на основе полиимидного связующего ВС-51 после ускоренного старения при температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Продолжительность старения препрега, ч	Массовая доля, %			Текучесть смолы, %	
	связующего	летучих веществ	растворимой смолы	с летучими	без летучих
В исходном состоянии	45,7	7,3	93,7	30,6	23,3
8	45,6	6,7	91,2	29,8	22,9
13	45,4	5,8	87,3	25,9	19,5
18	45,8	4,2	82,2	19,6	15,4
23	46,0	2,7	78,5	12,3	9,6

Наиболее чувствительными характеристиками препрега, существенно изменяющимися в процессе ускоренного старения, являются массовая доля летучих веществ и текучесть смолы. Так, после 23 ч воздействия повышенной температуры количество летучих веществ в препреге снизилось в 2,7 раза, текучесть смолы – в 2,5 раза, а содержание растворимой смолы снизилось всего на 16 %.

В дальнейших исследованиях для оценки технологических свойств препрега в процессе хранения определяли массовую долю связующего и летучих веществ, а также текучесть смолы.

Зависимость технологических свойств от сроков и условий хранения исследовали на трех партиях препрега углепластика. Для всех партий получены практически одинаковые значения массовой доли летучих веществ и текучести смолы, что позволило их объединить и привести усредненные значения по трем партиям (табл. 3).

**Технологические свойства* препрега углепластика
на основе полиимидного связующего ВС-51 после хранения в различных условиях**

Условия хранения препрега	Срок хранения препрега, мес	Массовая доля, %		Текучесть смолы (с летучими), %
		связующего	летучих веществ	
В исходном состоянии	—	<u>42,9–46,1</u>	<u>6,9–7,6</u>	<u>28,4–32,2</u>
		44,8	7,1	30,8
В помещении при температуре 20±5 °С	2	<u>42,4–44,5</u>	<u>6,7–7,1</u>	<u>30,1–31,7</u>
		43,8	6,8	30,9
	3	<u>43,5–45,6</u>	<u>6,2–7,0</u>	<u>28,7–30,8</u>
		44,3	6,5	29,4
	4	<u>43,8–45,1</u>	<u>5,9–6,8</u>	<u>25,3–26,5</u>
	44,5	6,4	26,0	
В холодильнике при температуре 0–5 °С	6	<u>43,6–44,5</u>	<u>3,5–4,9</u>	<u>19,7–21,8</u>
		44,1	4,2	21,2
	10	<u>43,3–43,9</u>	<u>0,6–1,1</u>	<u>8,3–11,7</u>
		43,7	0,7	10,8
	3	<u>43,1–44,4</u>	<u>7,1–7,8</u>	<u>29,6–32,9</u>
	43,8	7,5	30,9	
В морозильной камере при температуре –(18±5) °С	4	<u>43,5–45,5</u>	<u>7,0–7,4</u>	<u>29,8–32,4</u>
		44,8	7,2	31,0
	6	<u>43,4–44,6</u>	<u>7,0–7,2</u>	<u>29,6–31,4</u>
		44,1	7,1	30,4
	10	<u>43,1–45,2</u>	<u>6,8–7,1</u>	<u>28,8–32,1</u>
	44,0	7,0	30,1	
В морозильной камере при температуре –(18±5) °С	12	<u>42,5–44,4</u>	<u>6,8–7,1</u>	<u>27,8–29,4</u>
		43,3	6,9	28,7
	3	<u>42,9–44,5</u>	<u>7,1–7,4</u>	<u>30,3–33,7</u>
		43,5	7,2	32,4
	6	<u>44,7–46,0</u>	<u>7,3–7,3</u>	<u>30,2–32,2</u>
	45,6	7,3	31,5	
В морозильной камере при температуре –(18±5) °С	10	<u>42,5–43,9</u>	<u>6,9–7,3</u>	<u>29,3–30,6</u>
		43,2	7,1	30,1
	12	<u>43,7–44,2</u>	<u>6,5–7,1</u>	<u>27,5–30,2</u>
		43,4	6,8	28,6
	15	<u>43,7–45,0</u>	<u>5,8–7,2</u>	<u>26,5–29,4</u>
	44,2	6,4	27,2	

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

Изменение текучести смолы в препреге углепластика при хранении в различных условиях представлено на рис. 5.

При хранении в морозильной камере при температуре –(18±5) °С и в холодильнике при температуре 0–5 °С технологические свойства препрега практически не меняются. Это позволяет прогнозировать длительные сроки (до 10–12 мес) хранения препрега на полиимидном связующем ВС-51 при пониженных температурах. При хранении в помещении при температуре 20±5 °С в течение 3 мес технологические свойства препрега остаются практически без изменений. После 4 мес хранения массовая доля летучих веществ и текучесть смолы уменьшились на 12–15 %. Такие изменения не критичны, но уже наметилась тенденция к ухудшению указанных характеристик и через 6 мес хранения значения данных показателей уменьшились на 31–41 %.

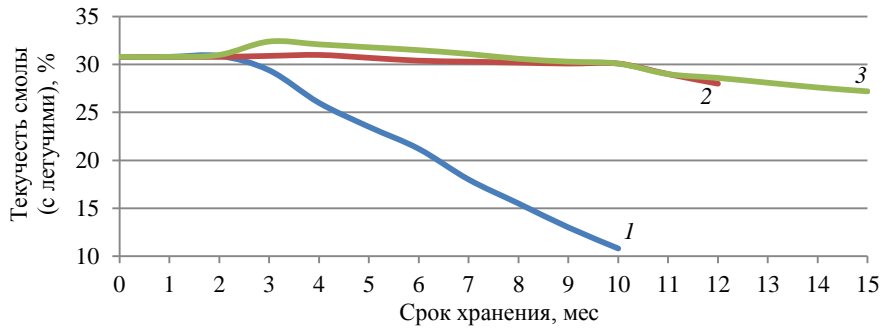


Рис. 5. Изменение текучести смолы (средние значения) в препреге углепластика на основе полиимидного связующего ВС-51 в зависимости от условий и сроков хранения: 1 – в помещении; 2 – в холодильнике; 3 – в морозильной камере

Более длительный срок хранения препрега (без изменения технологических свойств) на полиимидном связующем ВС-51 при температуре $20\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с зарубежными препрегами на полиимидных связующих (табл. 1) связан с тем, что рассматриваемые зарубежные препреги изготовлены по растворной технологии. При хранении и работе с таким препрегом при комнатной температуре в результате испарения растворителя увеличивается количество нерастворимой смолы и снижается ее реакционная активность, что в дальнейшем ухудшает свойства материала.

Для подтверждения способности к переработке препрега после длительного хранения методом термомеханического анализа в условиях динамического нагрева определены температурный интервал плавления и значения вязкости связующего ВС-51 в препреге. На рис. 6 приведены кривые термомеханического анализа исходного препрега и после хранения в течение 12 мес в морозильной камере при температуре $-(18\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ и в холодильнике при температуре $0-5\text{ }^\circ\text{C}$, а также в течение 4 мес в помещении при температуре $20\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$.

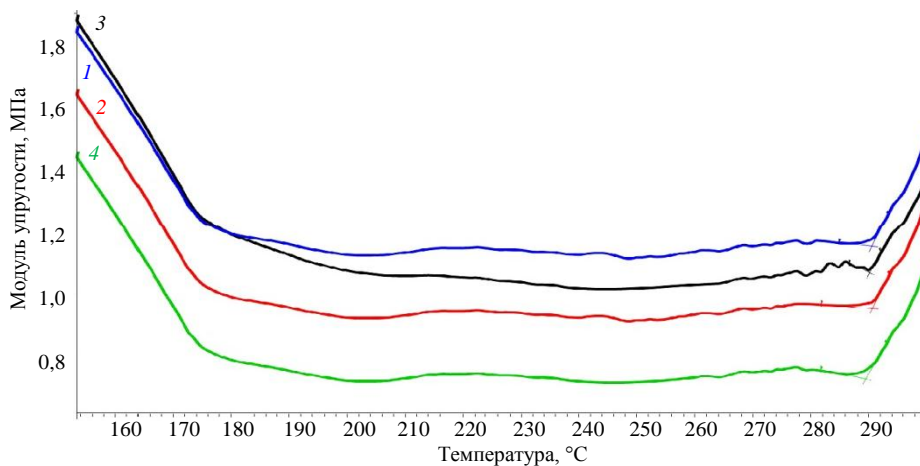


Рис. 6. Кривые термомеханического анализа при динамическом нагреве препрега на основе полиимидного связующего ВС-51 после хранения: 1 – исходный препрег; 2 – 4 мес в помещении; 3 – 12 мес в холодильнике; 4 – 12 мес в морозильной камере

Для всех исследованных образцов препрегов (как исходного, так и после длительного хранения) температурный интервал образования расплава имидопласта, сформированного на первой стадии отверждения полиимидного связующего [38], с минимальной вязкостью составляет $210-290\text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты термического анализа и стабильность технологических свойств препрега углепластика на основе полиимидного связующего ВС-51 при длительном хранении (табл. 3) подтверждают возможность изготовления углепластика по разработанному режиму без корректировки параметров формования.

Параллельно с оценкой технологических свойств препрегов в процессе хранения исследованы свойства углепластика на их основе. После хранения препрегов в различных условиях при одном технологическом режиме изготовлены углепластики и исследованы их физические и упруго-прочностные свойства.

В табл. 4 приведены значения физических свойств углепластика, изготовленного из препрега на основе полиимидного связующего ВС-51, после хранения препрега в различных условиях.

Таблица 4

Физические свойства (средние значения) углепластика из препрега, хранившегося в различных условиях

Условия хранения препрега	Срок хранения препрега, мес	Массовая доля связующего, %	Плотность, г/см ³	Толщина монослоя, мм	Температура стеклования, °С
В исходном состоянии	–	34,5	1,562	0,193	363
В помещении при температуре 20±5 °С	2	33,8	1,564	0,191	–
	3	34,1	1,564	0,193	364
	4	35,4	1,557	0,195	–
	6	35,2	1,542	0,204	353
В холодильнике при температуре 0–5 °С	6	33,6	1,567	0,189	356
	10	35,0	1,561	0,194	–
	12	34,2	1,559	0,196	361
В морозильной камере при температуре –(18±5) °С	6	34,7	1,565	0,195	–
	12	33,8	1,569	0,192	359
	15	34,8	1,558	0,198	–

Длительное хранение препрега при пониженной температуре не сказывается на качестве изготовленных из него углепластиков, что подтверждают значения плотности и толщины монослоя, равные значениям данных показателей для углепластика на основе исходного препрега. Плотность углепластика на основе препрега, хранившегося в помещении при температуре 20±5 °С в течение 6 мес, снизилась, а толщина монослоя увеличилась, что свидетельствует об ухудшении упрессовки материала и, возможно, увеличении пористости вследствие старения препрега. Температура стеклования при этом не изменилась.

Плиты углепластика, изготовленные из препрега после длительного хранения, исследованы ультразвуковым эхо-импульсным методом. Крупных дефектов в отформованных плитах не обнаружено. Дополнительно проанализированы С-сканы плит углепластика по величине амплитуды донных эхо-сигналов (рис. 7), которые представляют собой цветное изображение результатов контроля плиты на виде сверху с разрешением 1×1 мм. Каждая точка цветовой палитры от фиолетового до красного соответствует величине амплитуды донного эхо-сигнала от 0 до 100 %.

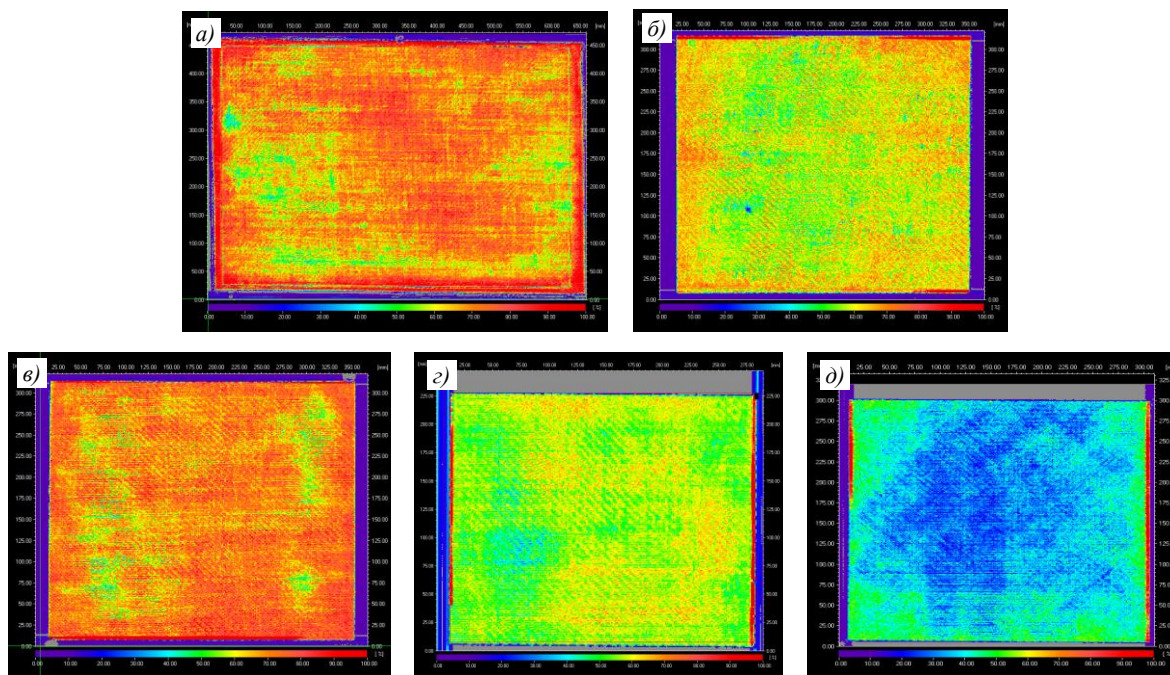


Рис. 7. С-сканы плит углепластика на основе полиимидного связующего ВС-51 из препрега после хранения: *a* – исходный препрег; *б* – 12 мес в холодильнике; *в* – 12 мес в морозильной камере; *г* – 3 мес в помещении; *д* – 6 мес в помещении

В зависимости от условий и срока хранения препрега до формования плит меняется величина амплитуд донных эхо-сигналов. Снижение величины амплитуды донного эхо-сигнала при отсутствии крупных дефектов может свидетельствовать о наличии в плитах множества мелких несплошностей (пористости) [39, 40]. Чем больше это снижение (ближе к фиолетовому цвету на С-скане), тем больше может быть доля пористости в материале плиты. Так, величина амплитуды донного эхо-сигнала по всей плите, изготовленной из исходного препрега (рис. 7, *a*), составляет от 70 до 100 % (от оранжевого до красного цвета), что соответствует близкой к нулю пористости. Величина амплитуды донных эхо-сигналов в некоторых зонах плиты из препрега, хранившегося в холодильнике и морозильной камере в течение 12 мес (рис. 7, *б*, *в*), снижается не более чем на 4 дБ (зеленый цвет) по сравнению с показателями плиты из исходного препрега, что может свидетельствовать о появлении незначительной пористости (не более 0,5 %). Снижение амплитуды донного эхо-сигнала в некоторых зонах плиты из препрега, хранившегося в помещении в течение 3 мес (рис. 7, *г*), также не превышает 4 дБ. Соответственно, пористость в этом месте если и повысилась, то не более чем на 0,5 %. Для плит из препрега, хранившегося в помещении в течение 6 мес (рис. 7, *д*), в отдельных зонах наблюдается уже ощутимое снижение донного эхо-сигнала (синий цвет) – до 12 дБ относительно показателей плиты из исходного препрега, что может свидетельствовать о появлении пористости в плите ≥ 2 %.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- при хранении препрега в холодильнике и морозильной камере в течение 12 мес пористость в отформованных плитах практически не появилась по сравнению с плитами из исходного препрега;
- при хранении препрега в помещении в течение 3 мес изменения также не зафиксированы;
- при хранении препрега в помещении в течение 6 мес в отформованной плите появляется пористость, что в дальнейшем отразится на свойствах углепластика.

Данные неразрушающего контроля плит ультразвуковым методом согласуются с результатами исследований физических свойств углепластиков (табл. 4), подтвердившими снижение плотности и увеличение толщины монослоя и, как следствие, увеличение пористости в углепластике из препрега, хранившегося в помещении в течение 6 мес.

В табл. 5 и 6 приведены упруго-прочностные свойства углепластика, изготовленного из хранившегося в различных условиях препрега на основе полиимидного связующего ВС-51.

Таблица 5

Свойства углепластика из препрега, хранившегося при температуре 20 ± 5 °С

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств* углепластика из препрега со сроком хранения				
		в исходном состоянии	2 мес	3 мес	4 мес	6 мес
Прочность при растяжении, МПа	23±3	$\frac{880-980}{900}$	–	$\frac{800-910}{860}$	$\frac{810-910}{860}$	$\frac{780-900}{840}$
	320	$\frac{780-860}{820}$	–	$\frac{730-810}{780}$	$\frac{740-810}{780}$	$\frac{730-900}{790}$
Модуль упругости при растяжении, ГПа	23±3	$\frac{60-65}{62}$	–	$\frac{61-66}{63}$	$\frac{56-67}{61}$	$\frac{55-60}{58}$
Прочность при статическом изгибе, МПа	23±3	$\frac{730-810}{770}$	$\frac{700-800}{760}$	$\frac{720-830}{760}$	$\frac{540-770}{650}$	$\frac{590-660}{620}$
	320	$\frac{520-610}{570}$	$\frac{520-580}{550}$	$\frac{550-660}{610}$	$\frac{540-640}{600}$	$\frac{440-550}{480}$
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	23±3	$\frac{55-61}{58}$	$\frac{56-59}{58}$	$\frac{57-62}{59}$	$\frac{52-55}{53}$	$\frac{53-54}{54}$
	320	$\frac{54-62}{57}$	$\frac{55-57}{56}$	$\frac{58-58}{58}$	$\frac{52-56}{52}$	$\frac{51-55}{53}$
Прочность при сжатии, МПа	23±3	$\frac{415-490}{450}$	$\frac{425-530}{470}$	$\frac{425-525}{475}$	–	$\frac{320-440}{360}$
	320	$\frac{290-360}{330}$	$\frac{315-400}{350}$	$\frac{370-440}{410}$	–	$\frac{275-400}{340}$

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

При старении изменение свойств связующего в составе препрега (за которые в большей или равной степени отвечает связующее или состояние границы раздела) наиболее наглядно проявляется при таких испытаниях, как изгиб или сжатие.

Снижение прочности при растяжении (характеристика, за которую в гораздо большей степени отвечает наполнитель) как при комнатной температуре, так и при температуре 320 °С для углепластика из препрега, хранившегося в помещении при температуре 20 ± 5 °С в течение 6 мес, не превышает 6,6 % (табл. 5).

Прочность углепластика при статическом изгибе изменяется уже после 4 мес хранения препрега при комнатной температуре, а прочность углепластика из препрега, хранившегося 6 мес, снизилась на 21 % (рис. 8). При использовании препрега, хранившегося 6 мес, прочность углепластика при сжатии при температуре испытаний 23 ± 3 °С также снижается на 20 % (рис. 9).

После 12 мес хранения препрега при пониженных температурах (холодильник, морозильная камера) упруго-прочностные свойства углепластика на его основе сохранились на 86–100 % при одинаковом уровне плотности и толщины монослоя (табл. 6).

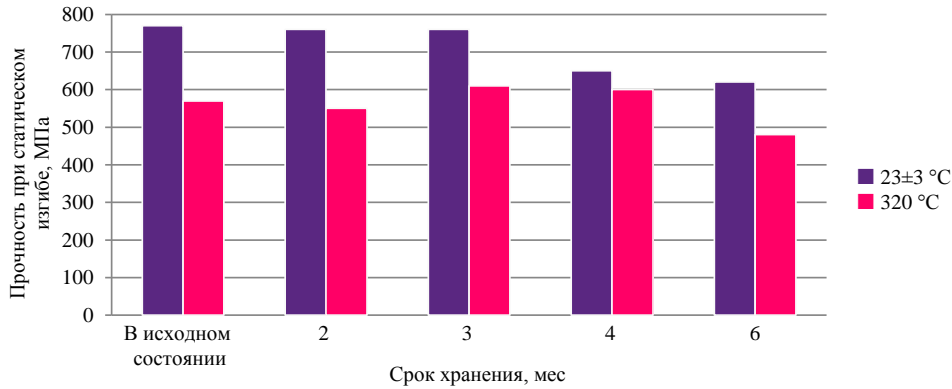


Рис. 8. Прочность при статическом изгибе углепластика из препрега, хранившегося в помещении при температуре 20±5 °C

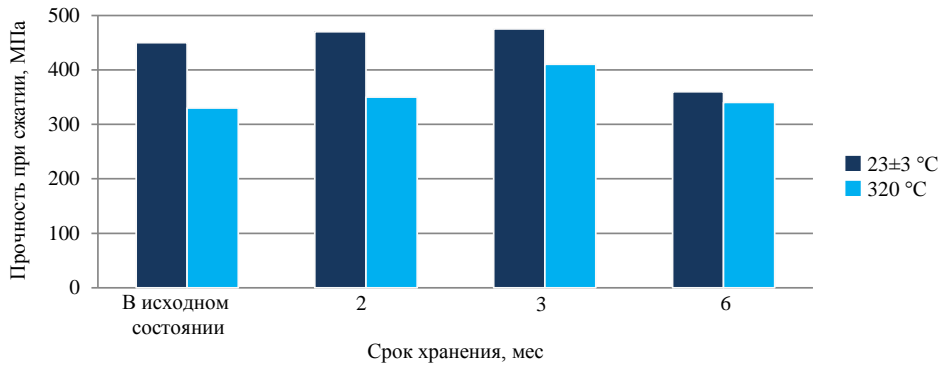


Рис. 9. Прочность при сжатии углепластика из препрега, хранившегося в помещении при температуре 20±5 °C

Таблица 6

Свойства углепластика из препрега, хранившегося при пониженных температурах

Свойства	Температура испытания, °C	Значение свойств* углепластика, хранившегося различное время при температуре					
		в исходном состоянии	0–5 °C			–(18±5) °C	
			6 мес	10 мес	12 мес	12 мес	15 мес
Прочность при растяжении, МПа	23±3	<u>880–980</u> 900	–	<u>870–930</u> 890	<u>830–920</u> 880	<u>800–870</u> 840	–
	320	<u>780–860</u> 820	–	<u>810–890</u> 840	<u>730–770</u> 750	<u>680–730</u> 760	–
Модуль упругости при растяжении, ГПа	23±3	<u>60–65</u> 62	–	<u>62–70</u> 66	<u>60–62</u> 61	<u>58–60</u> 59	–
Прочность при статическом изгибе, МПа	23±3	<u>730–810</u> 770	<u>680–780</u> 720	<u>600–840</u> 690	<u>690–780</u> 730	<u>700–790</u> 750	<u>610–720</u> 690
	320	<u>520–610</u> 570	<u>540–690</u> 590	<u>470–670</u> 610	<u>610–700</u> 650	<u>570–640</u> 610	<u>510–580</u> 550
Модуль упругости при статическом изгибе, ГПа	23±3	<u>55–61</u> 58	<u>53–56</u> 55	<u>58–61</u> 60	<u>55–62</u> 59	<u>54–61</u> 57	<u>51–53</u> 52
	320	<u>54–62</u> 57	<u>55–57</u> 56	<u>58–61</u> 59	<u>51–60</u> 55	<u>51–63</u> 56	<u>50–51</u> 50
Прочность при сжатии, МПа	23±3	<u>415–490</u> 450	<u>380–460</u> 435	<u>405–500</u> 450	<u>390–450</u> 420	<u>400–495</u> 470	–
	320	<u>290–360</u> 330	<u>280–415</u> 320	<u>305–435</u> 360	<u>290–370</u> 350	<u>310–415</u> 360	–

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

Следует еще раз отметить, что важным фактором является строгое соблюдение условий хранения и подготовки препрега к работе после холодильной или морозильной камеры, прописанных в нормативной документации. Соблюдение правил хранения и обеспечение герметичности упаковки препрега во избежание попадания конденсационной влаги особенно актуально для полиимидных связующих, учитывая особенности их химической природы и высокую чувствительность к влаге [23, 24, 38].

Заключения

Полученные результаты позволяют сделать вывод о длительных сроках хранения препрега на основе расплавленного полиимидного связующего ВС-51 без ухудшения его технологических характеристик и свойств углепластика на его основе: в морозильной камере при температуре $-(18 \pm 5)^\circ\text{C}$ – не менее 12 мес; в холодильнике при температуре $0-5^\circ\text{C}$ – не менее 12 мес; в помещении при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ – не менее 3 мес. Следует отметить, что углепластик из препрега на основе расплавленного полиимидного связующего ВС-51 после его длительного хранения можно изготавливать по разработанному режиму без корректировки параметров формования.

Данные, полученные при хранении препрега на основе расплавленного полиимидного связующего ВС-51 при пониженных температурах (холодильник, морозильная камера) до 12 мес, согласуются с данными по хранению препрегов на основе полиимидных связующих, выпускаемых зарубежными производителями, а срок хранения препрега на основе связующего ВС-51 в помещении существенно превышает срок хранения зарубежных аналогов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н., старшему научному сотруднику Н.В. Антюфеевой за помощь в интерпретации результатов исследований препрега, проведенных методом термомеханического анализа.

Список источников

1. ВИАМ 90 лет: гордимся прошлым, создаем будущее / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. 168 с.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. 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.
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: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. 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: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
8. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
9. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 719 с.

10. 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.
11. Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Малютин Е.В. *Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов: в 2 ч. / под ред. Ю.В. Василевича*. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 1. 295 с.
12. Василевич Ю.В., Горелый К.А., Сахоненко В.М., Сахоненко С.В., Малютин Е.В. *Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов: в 2 ч. / под ред. Ю.В. Василевича*. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 2. 283 с.
13. Доумчариева Ж., Капан С.С. Автоматизация температурного режима пропиточной установки для получения препрега // *Технические науки. Сер. 12: Автоматизированные системы управления на производстве*. URL: http://www.rusnauka.com/18_NPRT_2017/Tecnic/12_227091.doc.htm (дата обращения: 12.01.2023).
14. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. О технологии изготовления препрега // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 4. С. 26–31.
15. Полякова Л.Ю. Управление технологическим процессом изготовления препрега для изделий авиационной техники: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2007. 170 с.
16. Гуняева А.Г., Вешкин Е.А., Антюфеева Н.В., Панафидникова А.Н., Ефимик В.А. Исследование влияния конденсационной влаги на препрег углепластика на основе растворного эпоксидного связующего и ПКМ на его основе // *Труды ВИАМ*. 2019. № 9 (81). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88.
17. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Оценка влияния длительности и условий хранения на свойства препрега и ПКМ на его основе // *Труды ВИАМ*. 2017. № 8 (56). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-10-10.
18. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В., Абрамов П.А., Сатдинов Р.А. Опыт применения технологического контроля полуфабрикатов из полимерных композиционных материалов // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. Т. 16. № 6 (2). С. 393–398.
19. Черфас Л.В., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Антюфеева Н.В. Анализ срока годности наномодифицированного препрега при хранении по его реакционной способности // *Труды ВИАМ*. 2016. № 1 (37). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
20. Черемухина И.В. Технологии с регулируемым разделением компонентов связующего и воздействием энергетических полей для создания армированных пластиков с комплексом улучшенных свойств: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов: Саратов. гос. технич. ун-т; М.: МИРЭА – Рос. технолог. ун-т, 2022. 348 с.
21. Савицкий Р.С., Галиуллин А.Р., Мантусова О.Ю., Вешкин Е.А. Оценка влияния времени хранения препрега на коробление и свойства ПКМ на его основе // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57.
22. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
23. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Хасков М.А. Высокотемпературные углепластики на основе терморективного полиимидного связующего // *Вопросы материаловедения*. 2020. № 3 (103). С. 89–102. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-89-102.
24. Михайлин Ю.А. *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы*. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
25. Yang S.-Y. *Advance polyimide materials: synthesis, characterization, and applications*. 1st ed. Elsevier, 2018. 498 p.
26. Cho D., Drzal L.T. Phenylethynyl-terminated polyimide, exfoliated graphite nanoplatelets, and the composites: an overview // *Carbon letters*. 2016. Vol. 19. P. 1–11.
27. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Development of novel high T_g polyimide-based composites. Part II: Mechanical characterization // *Journal of Composite Materials*. 2018. Vol. 52. No. 2. P. 261–274.

28. Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Курносое А.О., Гуняева А.Г. Стеклопластики на основе термо-реактивных полиимидных связующих // Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности». М. ВИАМ, 2020. С. 31–41.
29. Cavano P.J., Winters W.E. Fiber reinforced PMR polyimide composites. Washington, D.C.: NASA Lewis Researcher Center, 1978. 105 p.
30. Alston W.B. Shelf life of PMR Polyimide monomer solutions and prepregs extended / NASA. Research and Technology, 1999. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050192224> (дата обращения: 12.01.2023).
31. Avimid[®]R Polyimide Composite: Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2012. АЕСМ-00051. URL: <https://matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3dcb6c37bd39469c8e92b27045a13ea4> (дата обращения: 12.01.2023).
32. Avimid[®]RB Polyimide Composite: Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2012. АЕСМ-00052. URL: <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=d3d9f6997a2145d087bfc9342a8ee61b> (дата обращения: 12.01.2023).
33. CYCOM[®]2237 Polyimide Resin System. Technical Data Sheet // Cytec engineered materials. 2012. АЕСМ-00034. URL: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-2237> (дата обращения: 07.07.2023).
34. Aerospace. Advance Composite Materials Selector Guide // Toray Advanced Composites. URL: https://www.toraytac.com/media/ca3eea73-6961-4ea8-adc7-5d1b861684f6/Bxgrfg/TAC/Documents/Selector%20Guides/Toray_Advanced_Composite_Material_Portfolio_Selector_Guide.pdf (дата обращения: 01.12.2022).
35. Product TC890 // Toray Advanced Composites. URL: <https://www.toraytac.com/product-explorer/products/mhdR/TC890> (дата обращения: 07.07.2023).
36. High temperature composite materials // UBE Industries Ltd., 2007. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/high-temperature-composite-materials-upilex-5a5302.html> (дата обращения: 07.07.2023).
37. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В., Валуева М.И. Расплавное полиимидное связующее марки ВС-51 для термостойких ПКМ // III Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: ВИАМ, 2018. С. 136–146.
38. Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Ахмадиева К.Р. Технологические особенности получения высокотемпературных полиимидных углепластиков. Зарубежный опыт. Обзор // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.
39. Бойчук А.С., Диков И.А., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Определение пористости в монолитных деталях и агрегатах крыла самолета, изготавливаемых из ПКМ, с применением ультразвукового эхо-импульсного метода // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 3–9.
40. Диков И.А., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Генералов А.С. Особенности определения пористости в деталях из ПКМ с применением ультразвукового эхо-импульсного метода контроля // Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: материалы X Всерос. конф. «ТестМат». М.: ВИАМ, 2018. С. 65–79.

References

1. *VIAM 90 years old: proud of the past, creating the future*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC “Kurchatov Institute” – VIAM, 2022, 168 p.
2. Kablov E.N. *Trends and guidelines for innovative development of Russia*. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p.
3. 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.
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: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

6. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. 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://journal.viam.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
8. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. Ed. A.A. Berlin. St. Petersburg: Profession, 2008, 560 p.
9. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in technology*. St. Petersburg: Scientific principles and technologies, 2013, 719 p.
10. 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.
11. Vasilevich Yu.V., Gorely K.A., Sakhonenko V.M., Sakhonenko S.V., Malyutin E.V. *Mechanics of prepregs – calculation of products made of reinforced composite materials*: in 2 parts. Ed. Yu.V. Vasilevich. Minsk: BNTU, 2016, part 1, 295 p.
12. Vasilevich Yu.V., Gorely K.A., Sakhonenko V.M., Sakhonenko S.V., Malyutin E.V. *Mechanics of prepregs - calculation of products made of reinforced composite materials*: in 2 parts. Ed. Yu.V. Vasilevich. Minsk: BNTU, 2016, part 2, 283 p.
13. Doumcharieva Zh., Kapan S.S. Automation of the temperature regime of an impregnation installation for producing prepreg. *Technical Sciences*, ser. 12: Automated control systems in production. Available at: http://www.rusnauka.com/18_NPRT_2017/Tecnic/12_227091.doc.htm (accessed: January 12, 2023).
14. Satdinov R.A., Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. On the technology of prepreg production. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 4, pp. 26–31.
15. Polyakova L.Yu. *Control of the technological process of manufacturing prepreg for aircraft products*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Ufa: Ufimsk. state aviation tech. univ., 2007, 170 p.
16. Gunyaeva A.G., Veshkin E.A., Antyufeeva N.V., Panafidnikova A.N., Efimik V.A. Research of influence of the condensation moisture on carbon fiber plastic prepreg on the basis of solution epoxy binder and PCM on its basis. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-80-88.
17. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V. Evaluation of effect of duration and storage condition on the properties of prepreg and PCM based on it. *Trudy VIAM*, 2017, no. 8, paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-10-10.
18. Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V., Abramov P.A., Satdinov R.A. Experience in the application of technological control of semi-finished products from polymer composite materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 6 (2), pp. 393–398.
19. Cherfas L.V., Gunyaeva A.G., Komarova O.A., Antyufeeva N.V. The analysis of nanomodified prepreg shelf life by its reactivity at storage. *Trudy VIAM*, 2016, no. 1 (37), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
20. Cheremukhina I.V. *Technologies with controlled separation of binder components and the influence of energy fields for the creation of reinforced plastics with a complex of improved properties*: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Saratov: Saratov State Tech. Univ.; Moscow: MIREA – Rus. Tech. Univ., 2022, 348 p.
21. Savitskiy R.S., Galiullin A.R., Mantusova O.Yu., Veshkin E.A. Valuation of the effect of prepreg storage time on warping and PCM properties based on it. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-48-57.
22. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Akhmadieva K.R. World market of high temperature polyimide carbon plastic (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
23. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Haskov M.A. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on a thermosetting polyimide binder. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 3 (103), pp. 89–102. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-103-3-89-102.
24. Mikhailin Yu.A. *Heat-resistant polymers and polymer materials*. St. Petersburg: Profession, 2006, 624 p.

25. Yang S.-Y. *Advance polyimide materials: synthesis, characterization, and applications*. 1st ed. Elsevier, 2018, 498 p.
26. Cho D., Drzal L.T. Phenylethynyl-terminated polyimide, exfoliated graphite nanoplatelets, and the composites: an overview. *Carbon letters*, 2016, vol. 19, pp. 1–11.
27. Tsampas S., Fernberg P., Joffe R. Development of novel high T_g polyimide-based composites. Part II: Mechanical characterization. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 261–274.
28. Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Kurnosov A.O., Gunyaeva A.G. Fiberglass based on thermosetting polyimide binders. *All-Rus. Scientific-technical Conf. "New generation polymer composite materials for civil industries"*. Moscow: VIAM, 2020. pp. 31–41.
29. Cavano P.J., Winters W.E. *Fiber reinforced PMR polyimide composites*. Washington, D.C.: NASA Lewis Researcher Center, 1978, 105 p.
30. Alston W.B. *Shelf life of PMR Polyimide monomer solutions and prepregs extended*. NASA. Research and Technology, 1999. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050192224> (accessed: January 12, 2023).
31. Avimid[®]R Polyimide Composite. Available at: <https://matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=3dcb6c37bd39469c8e92b27045a13ea4> (accessed: January 12, 2023).
32. Avimid[®]RB Polyimide Composite. Available at: <https://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=d3d9f6997a2145d087bfc9342a8ee61b> (accessed: January 12, 2023).
33. CYCOM[®]2237 Polyimide Resin System. Available at: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-2237> (accessed: July 07, 2023).
34. *Aerospace. Advance Composite Materials Selector Guide*. Available at: https://www.toraytac.com/media/ca3eea73-6961-4ea8-adc7-5d1b861684f6/Bxgrfg/TAC/Documents/Selector%20Guides/Toray_Advanced_Composite_Material_Portfolio_Selector_Guide.pdf (accessed: December 01, 2023).
35. *Product TC890*. Available at: <https://www.toraytac.com/product-explorer/products/mhdR/TC890> (accessed: July 07, 2023).
36. *High temperature composite materials*. Available at: <https://pdf4pro.com/amp/view/high-temperature-composite-materials-upilex-5a5302.html> (accessed: July 07, 2023).
37. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmadieva K.R., Zelenina I.V., Valueva M.I. Melt polyimide binder grade VS-51 for heat-resistant PCM. *III All-Rus. Scientific-technical Conf. "Polymer composite materials and production technologies of a new generation"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 136–146.
38. Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Ahmadiyeva K.R. Technological features of obtaining high temperature polyimide carbons. Foreign experience (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-80-95.
39. Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S. Determination of porosity in monolithic parts and assemblies of an aircraft wing, made of PCM, using the ultrasonic echo-pulse method. *Defektoskopiya*, 2019, no. 1, pp. 3–9.
40. Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S. Features of determining porosity in PCM parts using ultrasonic echo-pulse testing method. *Main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry: materials X All-Rus. conf. "TestMat"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 65–79.

Информация об авторах

Валуева Мария Игоревна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зеленина Ирина Викторовна, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Mariya I. Valueva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Irina V. Zelenina, Leading Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia V. Nacharkina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 25.07.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.07.2023.
The article was submitted 25.07.2023; approved and accepted for publication after reviewing 31.07.2023.