

Научная статья

УДК 678/8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-71-85

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ НА СВОЙСТВА БИСМАЛЕИНИМИДНОГО ПРЕПРЕГА И УГЛЕПЛАСТИКА НА ЕГО ОСНОВЕ

А.В. Начаркина¹, И.В. Зеленина¹, Л.В. Черфас¹, Г.Б. Эльдяева¹, А.Г. Гуняева¹

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

Аннотация. Исследовано влияние различных условий хранения на свойства препрега углепластика марки ВКУ-74 на основе термостойкого расплавленного бисмалеинимидного связующего и равнопрочной углеродной ткани. Проведена оценка физико-механических характеристик образцов углепластика марки ВКУ-74, изготовленных из препрега после хранения в различных условиях. По результатам проведенных исследований установлен гарантийный срок хранения препрега в условиях помещения при температуре 20 ± 5 °С, холодильной камеры при $0 \div 5$ °С и морозильной камеры при -18 ± 5 °С.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, препрег, высокотемпературный углепластик, расплавленное бисмалеинимидное связующее, условия хранения, гарантийный срок хранения

Для цитирования: Начаркина А.В., Зеленина И.В., Черфас Л.В., Эльдяева Г.Б., Гуняева А.Г. Влияние условий хранения на свойства бисмалеинимидного препрега и углепластика на его основе // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 71–85. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-71-85.

Scientific article

INFLUENCE OF STORAGE CONDITIONS ON PROPERTIES OF BISMALIMID PREPREG AND CARBON FIBER COMPOSITE BASED ON IT

A.V. Nacharkina¹, I.V. Zelenina¹, L.V. Cherfas¹, G.B. Eldyaeva¹, A.G. Gunyaeva¹

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 effect of various storage conditions on the properties of the carbon fiber prepreg VKU-74 based on a heat-resistant melt bismaleimide binder and equal-strength carbon fabric was studied. The assessment of the physical and mechanical characteristics of carbon fiber VKU-74 samples made from prepreg after storage under various conditions. Based on the results of the conducted research, the warranty period for storing prepreg in a room at a temperature of 20 ± 5 °C, in a refrigerator at $0 \div 5$ °C, and in a freezer at 18 ± 5 °C has been established.

Keywords: polymer composite materials, prepreg, high-temperature carbon fiber reinforced plastics, melt bismaleimide binder, storage conditions, guaranteed shelf life

For citation: Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Cherfas L.V., Eldyaeva G.B., Gunyaeva A.G. Influence of storage conditions on properties of bismaleimid prepreg and carbon fiber composite based on it. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 71–85. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-71-85.

Введение

В последние десятилетия вырос спрос на высокопроизводительные и легкие материалы, что способствует развитию направления полимерных композиционных материалов (ПКМ). Наибольшую популярность в области изготовления композитов приобретают ПКМ на основе термореактивных полимерных матриц (связующих). Так, самый распространенный класс термореактивных связующих – эпоксидные, а ПКМ на их основе работоспособны при температурах от -60 до $+150$ °С. Однако в последнее время тенденции изменяются, также как и требования к конструкциям летательных аппаратов, а значит, и к материалам. При адаптации к возрастающим требованиям необходимы материалы, сочетающие как высокие физико-механические характеристики, так и выдерживающие повышенные рабочие температуры в диапазоне 200 – 300 °С. Для реализации характеристик при таких температурах специалисты исследуют и разрабатывают новые составы полимерных матриц и ПКМ на их основе [1–5].

Углепластики на основе бисмалеинимидных связующих – это настоящий прорыв в авиакосмической промышленности, т. е. там, где требуются материалы, работоспособные в условиях повышенных температур и нагрузок. Они демонстрируют стабильное сохранение характеристик в температурном диапазоне 200 – 250 °С, сохраняя высокие показатели механических свойств при таких температурах эксплуатации [6, 7]. Кроме того, возможность использования стандартного оборудования, сравнительно невысокие температуры переработки и отсутствие летучих продуктов в процессе формования представляют собой очевидные преимущества при организации производства ПКМ на основе бисмалеинимидных связующих [8]. В настоящее время современные ПКМ на основе бисмалеинимидных связующих находят применение в горячих зонах летательных аппаратов – например, в конструкции современных двигательных установок, создавая конкуренцию традиционным металлическим сплавам. Бисмалеинимидные материалы стали одним из ключевых элементов конструкции современных авиационных двигателей, где они занимают нишу между материалами на основе эпоксидных и полиимидных матриц. Их внедрение позволяет создавать детали, которые сочетают высокую термостойкость, прочность и малую массу. Рынок их потребления растет и по прогнозам к 2032 г. их доля вырастет с 4,1 до 10,1 % [9–11].

При разработке и запуске в производство препрега важным показателем является его жизнеспособность, т. е. гарантийный срок хранения, в течение которого изготовленные полуфабрикаты (препреги) хранятся без ухудшения технологических характеристик [12]. В зависимости от класса полимерного связующего, на основе которого изготавливается препрег, и условий его хранения (при повышенных или пониженных температурах) препреги могут храниться от нескольких суток до нескольких месяцев [13, 14].

Старение препрега при хранении – это комплексный процесс, который включает частичное отверждение, диффузию влаги, релаксацию связующего, что влияет на изменение свойств материала и, как следствие, приводит к необходимости корректировки технологического процесса. Даже при отрицательных температурах этот процесс не останавливается, а лишь значительно замедляется.

Старение бисмалеинимидного реактопластичного препрега вызывает постепенное, но уже необратимое протекание реакции отвержения еще на этапе хранения [15]. Это приводит к химическим изменениям:

– росту вязкости – в связующем увеличивается количество химических поперечных связей, что снижает его текучесть;

– сужению технологического окна – происходит уменьшение времени гелеобразования, что означает ранний переход материала в гелеобразное состояние при его нагреве и требует корректировки технологического режима отверждения материала;

– происходят небольшие изменения химического состава, реакционная способность снижается, что замедляет процесс его последующего отверждения.

Все эти изменения влияют на процессы формования препрега, поэтому необходимо корректировать параметры режима отверждения при изготовлении ПКМ.

Для производственных процессов изменение характеристик препрега при старении также имеет технологические аспекты [16–19]:

– происходит снижение липкости – это одно из первых и заметных проявлений старения материала, влияющее на качество выкладки;

– ухудшение драпируемости – материал становится более жестким, что ухудшает его технологичность при выкладке изделий сложной геометрической формы;

– снижение качества конечного изделия – повышается вязкость и уменьшается текучесть материала, что может привести к неполному удалению воздуха в процессе формования и образованию пор в готовом изделии и, как следствие, снижению физико-механических характеристик.

Поэтому очень важно исследовать процессы старения препрегов ПКМ [20], а также устанавливать и фиксировать в нормативной документации на материал конкретный гарантийный срок хранения при различных условиях – в морозильной камере, холодильнике и при комнатной температуре.

Однако механизм старения материалов на различных полимерных матрицах реализуется по-разному, что напрямую обусловлено различиями в их химической структуре и, как следствие, температурной стойкости и механизмах деградации. У эпоксидных ПКМ старение на начальном этапе ускоряет последующее отверждение из-за сшивки молекулярной сетки связующего, на поздних этапах (особенно при наличии влажности) происходит разрушение сшитой сетки под действием влаги. У ПКМ на бисмалеинимидной основе старение аналогично приводит к дальнейшему сшиванию через реакцию имидных циклов, главное отличие – они более устойчивы к воздействию влажной среды за счет ароматических азотсодержащих групп [21].

Минимальный срок годности препрега должен составлять не менее 14 дней, что необходимо для его переработки в условиях производственного цеха. Как правило, максимально возможный срок хранения обеспечивается в условиях морозильной камеры при температурах менее $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но в связи с тем, что в условиях производства часто присутствует в наличии холодильная, а не морозильная камера, представляет интерес также определение гарантийного срока хранения материала при температурах от 0 до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В табл. 1 представлены данные по срокам годности для различных препрегов на основе бисмалеинимидных связующих, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями [22–27].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан препрег углепластика марки ВКУ-74 на основе расплавленного бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 и равнопрочной углеродной ткани марки ВТкУ-5, предназначенный для изготовления изделий с рабочей температурой от -60 до $+220\text{ }^{\circ}\text{C}$. В данной статье представлены результаты исследования процесса старения препрега бисмалеинимидного углепластика ВКУ-74 для определения гарантийного срока хранения материала. Проведены испытания по определению реакционной активности и технологических свойств препрега после хранения в различных условиях. Исследовано также влияние условий хранения препрега на свойства углепластика на его основе – приведены физико-механические характеристики углепластиков, в том числе при повышенной рабочей температуре, характеризующей сохранение термостойкости материала.

Таблица 1

**Сроки годности выпускаемых на отечественном и зарубежном рынках препрегов
на основе бисмалеинимидных связующих**

Марка связующего/препрег на его основе (производитель, страна)	Срок годности, мес., при температуре хранения, °С		
	20÷25	от 0 до 5	–18
ВСТ-57 (ВИАМ, РФ)	1	4	12
SB 332 / M250 (Итекма, РФ)	1	–	12
ТЭИС-33М (ОНПП Технология, РФ)	–	1,5	12
HexPly®F655/ W3T282-42-F655 (Hexcel Corporation, США)	1	6	12
CYCOM®5250-4/T650-3K-8HS (Cytac Solvay Group, США)	1	3	12
RS-8HM/T300-6K (3K) (Toray Industries, Inc., Япония)	1	–	6
RM-3002 / T650-35-6K-UC309-5HS (Renegade Materials Corp., США)	1	–	12

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

Материалы и методы

Объект исследования – препрег углепластика ВКУ-74 (рис. 1, а) на основе расплавного термореактивного бисмалеинимидного связующего ВСТ-71 и равнопрочной углеродной ткани ВТкУ-5 с поверхностной плотностью 200 г/м², а также углепластик (рис. 1, б), изготовленный из данного препрега после его хранения в различных условиях.

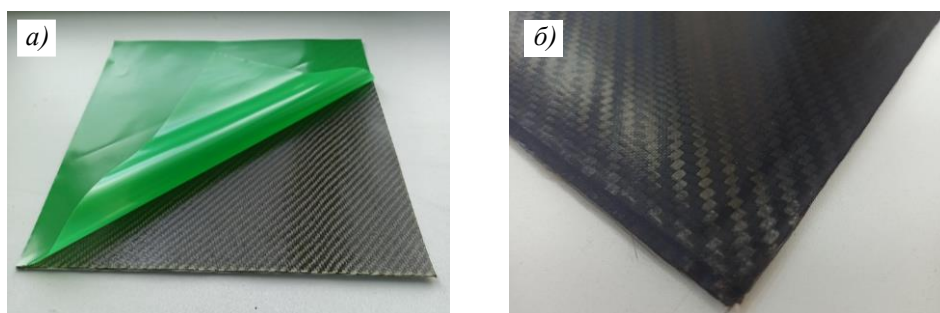


Рис. 1. Внешний вид препрега (а) и углепластика (б) марки ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего

Нарезанный по размерам заготовок для проведения исследований и изготовления углепластика, препрег ВКУ-74 герметично упакован и заложен на хранение. В табл. 2 приведены условия и сроки хранения препрега.

Таблица 2

Условия и сроки хранения препрега ВКУ-74

Условия хранения	Сроки хранения
В комнате при температуре 20 ± 5 °С	2, 3, 4, 5 недель
В холодильной камере при температуре $0 \div 5$ °С	3, 4, 5, 6 мес.
В морозильной камере при температуре -18 ± 5 °С	3, 4, 5, 6 мес.

После хранения в указанных условиях в течение различных периодов времени проводили исследование свойств препрега и углепластика на его основе.

Оценку технологических свойств препрега проводили: по ГОСТ Р 56796–2015 – массовую долю связующего; по ГОСТ 32660–2014 – текучесть смолы в препреге (при температуре 150 °С и удельном давлении 0,7 МПа в течение 30 мин).

Оценку реакционной активности препрегов проводили методами термического анализа:

– методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 56755–2015 в условиях динамического нагрева со скоростью 10 °С/мин;

– методом термомеханического анализа (ТМА) определяли время гелеобразования 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.

Проводили оценку следующих свойств углепластика:

- содержание связующего и толщина монослоя – по ГОСТ Р 56682–2015 (Метод II);
- плотность – по ГОСТ 15139–69 (Метод гидростатического взвешивания);
- температура стеклования – по ГОСТ Р 56753–2015;
- прочность и модуль упругости при статическом изгибе – по ГОСТ Р 56805–2015;
- прочность при межслойном сдвиге – по ГОСТ 32-659–2014.

Результаты и обсуждение

Для разработки технических условий на препрег углепластика марки ВКУ-74 необходимо выбрать нормируемые показатели качества, а также исследовать жизнеспособность препрега для определения условий и гарантийного срока его хранения.

При определении сроков хранения препрега углепластика ВКУ-74 отобраны образцы и заложены на хранение в различных условиях: в комнате при температуре 20 ± 5 °С; в холодильной камере при температуре $0 \div 5$ °С; в морозильной камере при температуре -18 ± 5 °С. После хранения в указанных условиях в течение различных периодов времени проводили исследование свойств препрега и углепластика на его основе. Перед проведением испытаний герметично упакованные образцы препрега после хранения в холодильнике и в морозильной камере выдерживали при температуре 20 ± 5 °С в течение не менее 6 ч до исчезновения с поверхности упаковочной пленки конденсированной влаги.

В табл. 3 приведены результаты исследования текучести смолы в препреге после хранения в различных условиях. Поскольку данная характеристика напрямую зависит от исходного значения массовой доли связующего в препреге, для проведения анализа подобраны образцы препрега с минимальным разбросом показателя текучести, который составил от 40,6 до 41,8 %.

На рис. 2 приведены кривые зависимости изменения текучести смолы в препреге от срока хранения в различных условиях.

Свойства препрега углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего после хранения препрега в различных условиях

Условия хранения препрега	Срок хранения	Массовая доля связующего, %	Текучесть смолы	
			численное значение, %	% сохранения от исходного значения
В исходном состоянии	—	41,4	23,4	—
В помещении при температуре 20 ± 5 °С	2 недели	40,7	20,6	88
	3 недели	41,2	18,8	80
	4 недели	41,4	15,6	66
	5 недель	40,9	7,9	33
В холодильнике при температуре $0\div 5$ °С	3 мес.	41,8	22,2	95
	4 мес.	40,8	18,6	79
	5 мес.	41,5	16,7	71
	6 мес.	41,1	15,4	66
В морозильной камере при температуре -18 ± 5 °С	3 мес.	41,7	23,1	100
	4 мес.	40,9	23,3	100
	5 мес.	41,2	22,9	98
	6 мес.	40,6	20,9	89

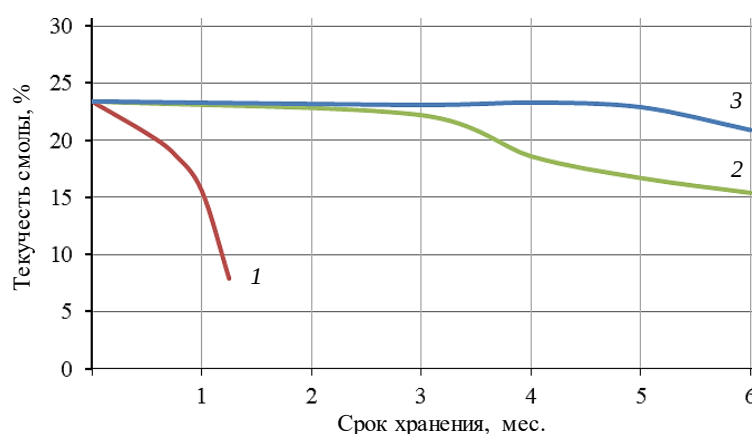


Рис. 2. Изменение текущей смолы в препреге углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего в зависимости от условий и сроков хранения: 1 – при температуре 20 ± 5 °С; 2 – в холодильнике при температуре от 0 до 5 °С; 3 – в морозильной камере при температуре -18 ± 5 °С

После трех недель хранения при температуре 20 ± 5 °С значение текущей смолы в препреге остается на уровне, близком к уровню значений для препрега в исходном состоянии, а после четырех недель данный параметр начинает стремительно меняться – наблюдается снижение текущей смолы, что указывает на ухудшение технологических свойств препрега из-за увеличения вязкости связующего. Поскольку данный параметр обеспечивает равномерность распределения связующего при изготовлении материала, при снижении текущей смолы для препрега на основе бисмалеинимидного связующего до значений <15 % возможно образование различных дефектов в виде несплошности полимерной матрицы в углепластике, что приводит к снижению как прочностных, так и эксплуатационных характеристик.

На одном уровне исходных значений остается текущесть смолы в препрегах после трех месяцев хранения при температурах $0\div 5$ °С и -18 ± 5 °С. В интервале хранения от трех до шести месяцев при температурах $0\div 5$ °С наблюдается постепенное снижение

текучести смолы до значения 15,4 %, что позволяет рекомендовать хранение при данной температуре не более шести месяцев. При температуре -18 ± 5 °С после шести месяцев хранения сохраняется значение показателя на уровне исходного.

Реакционную активность (температурный интервал, тепловой эффект процесса отверждения, наступление времени гелеобразования) связующего в исходном препреге ВКУ-74 и после его хранения в различных условиях исследовали методами ДСК и ТМА. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Реакционная активность препрега на основе бисмаленимидного связующего ВСТ-71
после хранения препрега в различных условиях**

Условия хранения препрега	Срок хранения	Температура пиков реакции отверждения, °С	Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	Время гелеобразования связующего в препреге, мин
В исходном состоянии	—	253	138	7,5
В помещении при температуре 20 ± 5 °С	2 недели	163/252	150	8,1
	3 недели	163/235	134	8,9
	4 недели	163/234	144	3,2
	5 недель	163/228	163	1,1
В холодильнике при температуре $0\div 5$ °С	3 мес.	165/253	152	6,7
	4 мес.	166/255	142	5,6
	5 мес.	168/253	148	4,5
	6 мес.	161/225	158	2,0
В морозильной камере при температуре -18 ± 5 °С	3 мес.	252	152	7,1
	4 мес.	162/255	144	7,7
	5 мес.	162/264	141	7,3
	6 мес.	166/255	156	6,1

Начиная с четвертой недели хранения препрега при температуре 20 ± 5 °С значение времени гелеобразования начинает сокращаться, что, также как и снижение текучести смолы, подтверждает начавшиеся процессы старения связующего в препреге. В условиях хранения при температуре -18 ± 5 °С в течение исследуемого срока хранения данная характеристика остается на уровне исходных значений, а в случае хранения при температуре $0\div 5$ °С снижается незначительно.

Значительные изменения можно видеть на ДСК-термограммах образцов препрега, испытанных после хранения в различных условиях, которые приведены на рис. 3.

При исследовании исходного препрега температура пика реакции отверждения составляет 250–260 °С, а после хранения во всех условиях наблюдается появление второго пика – при 160–170 °С. Следует отметить, что в условиях хранения при температуре -18 ± 5 °С второй пик появляется позже, начиная только с четвертого месяца. При этом общий тепловой эффект реакции отверждения практически не изменяется и имеет значения в интервале от 134 до 163 Дж/г.

По характеру изменения кривых можно отследить, что при хранении в комнатных условиях основной пик реакции отверждения смещается в сторону более низких температур (после хранения первый пик реакции соответствует значению 163 °С во время всего хранения, а второй пик находится в диапазоне значений температур 228–252 °С, в зависимости от срока хранения препрега: более долгое хранение способствует снижению значения температуры второго пика). Похожая ситуация происходит при хранении препрега в холодильнике при температурах от 0 до 5 °С – основной пик реакции

смещается в сторону низких температур и находится в диапазоне 161–168 °С. Значение второго пика начинает меняться только после шести месяцев хранения (225 °С). При температуре -18 ± 5 °С хранение препрега происходит лучше, поскольку серьезного смещения основного пика реакции отверждения не наблюдается, однако после шести месяцев хранения также наблюдается увеличение второго пика реакции на кривой ДСК-термограммы. Таким образом, на основе данных, полученных методом ДСК, можно сделать вывод, что максимального сохранения реакционной способности препрега на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71 можно достигнуть при хранении в морозильной камере.

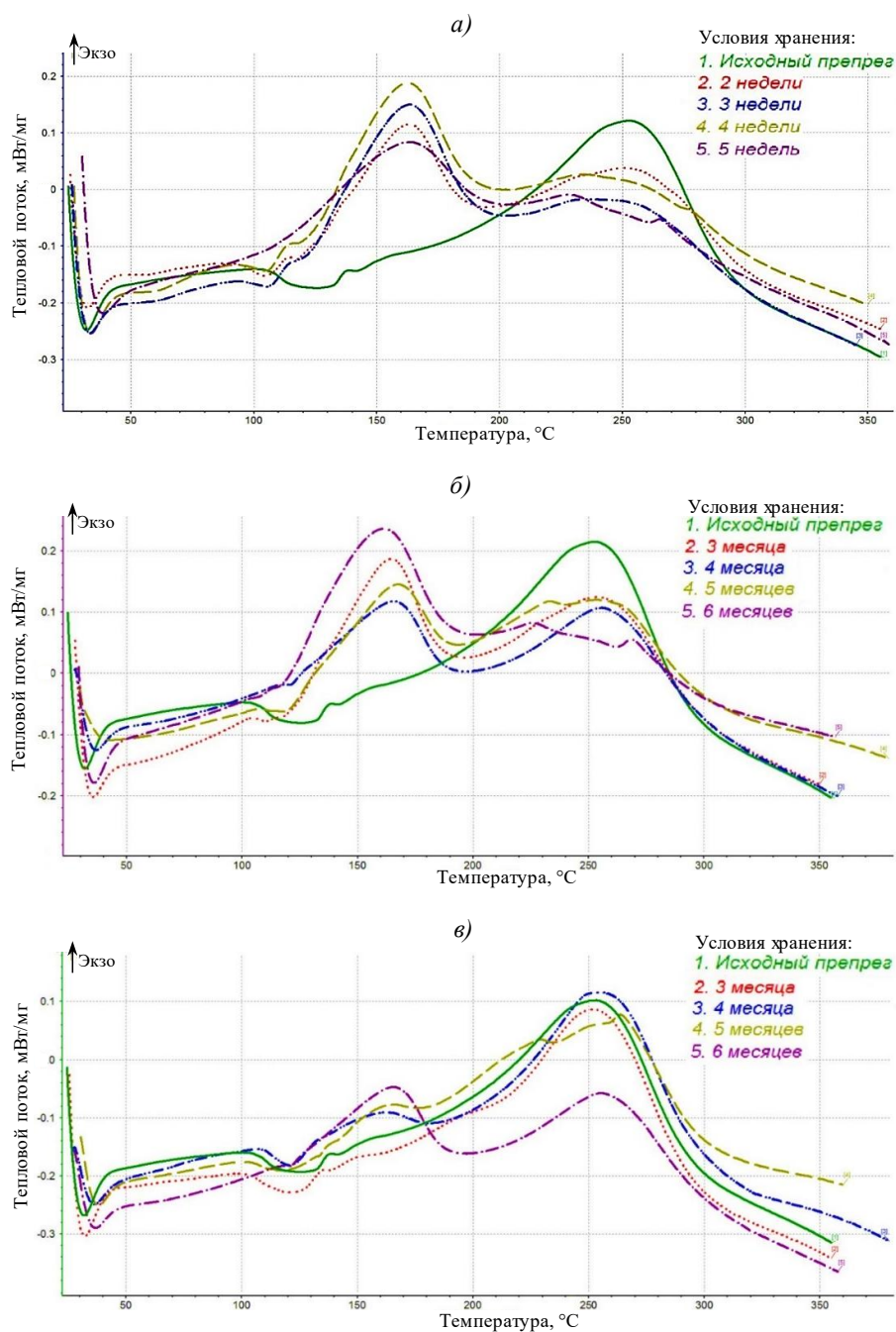


Рис. 3. ДСК-термограммы препрега углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего после хранения при температурах 20 ± 5 °С (а), от 0 до 5 °С (б) и 18 ± 5 °С (в)

После хранения в различных условиях из заготовок препрега изготовлены образцы углепластика и исследованы их физические свойства. Определены такие характеристики, как массовая доля связующего, плотность, толщина монослоя и температура стеклования. Полученные результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Физические свойства (средние значения) углепластика на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71 после хранения препрега в различных условиях

Условия хранения препрега	Срок хранения	Массовая доля связующего, %	Плотность, кг/м ³	Толщина монослоя, мм	Температура стеклования, °C	
					T_g^{dry} (сухое состояние)	T_g^{wet} (влажное состояние)
В исходном состоянии	–	34,0	1562	0,197	281	217
В помещении при температуре 20±5 °C	2 недели	35,8	1558	0,201	277	–
	3 недели	36,0	1551	0,215	278	–
	4 недели	37,8	1545	0,221	273	–
	5 недель	39,1	1527	0,228	264	–
В холодильнике при температуре 0÷5 °C	3 мес.	34,4	1560	0,198	286	225
	4 мес.	35,2	1552	0,203	293	228
	5 мес.	37,8	1546	0,213	261	227
	6 мес.	39,2	1538	0,243	257	230
В морозильной камере при температуре –18±5 °C	3 мес.	34,2	1563	0,199	289	221
	4 мес.	33,7	1560	0,196	286	226
	5 мес.	34,2	1561	0,198	285	237
	6 мес.	35,6	1554	0,200	287	235

Физические свойства (содержание связующего, толщина монослоя и плотность) углепластика, изготовленного из препрега, хранившегося в течение четырех недель в помещении при температуре 20±5 °C, в течение пяти месяцев в холодильнике при температуре от 0 до 5 °C и шести месяцев в морозильной камере при температуре –18±5 °C, остались на уровне аналогичных свойств углепластика, изготовленного из исходного препрега, и находятся в диапазоне допустимых значений для физических свойств, представленных в технических условиях на данный материал. У углепластика, изготовленного из препрега, хранившегося пять недель в помещении, значительно возрастает величина толщины монослоя в углепластике до 0,228 мм в соответствии с увеличением содержания связующего до 39,1 %, а также наблюдается постепенное снижение величины плотности до 1527 кг/м³, что коррелирует с данными из табл. 3, указывающими на заметное снижение текучести после четырех недель хранения в помещении. При оценке температуры стеклования углепластика после хранения в различных условиях, наблюдается допустимое снижение значения до ~260 °C, подтверждающее сохранение термостойких свойств материала. Исследования проведены в том числе после воздействия повышенной влажности, так как углепластики на основе бисмалеинимидных связующих подвержены сильному влиянию влажности. После водопоглощения показатель температуры стеклования увеличивается в среднем на 10 °C. В некоторых случаях воздействие влаги может приводить к релаксационным процессам в полимерной матрице, что сопровождается повышением температуры стеклования, а также это может быть связано с образованием более жестких полимерных цепей или увеличением плотности шивки в процессе тепловлажностного старения.

Данные по физическим показателям при хранении препрега в холодильнике в течение пяти месяцев уже находятся на границе диапазонов, обозначенных в технических условиях на материал, что не позволяет гарантировать качество получаемого материала после данного срока.

Результаты определения прочностных характеристик углепластика на основе препрега, хранившегося при температуре 20 ± 5 °С, представлены в табл. 6, а на основе препрега, хранившегося при температурах $0 \div 5$ °С и -18 ± 5 °С, – в табл. 7.

Таблица 6

**Свойства* углепластика на основе бисмаленимидного связующего ВСТ-71
после хранения препрега при температуре 20 ± 5 °С**

Срок хранения	Прочность при статическом изгибе, МПа		Прочность при межслойном сдвиге, МПа	
	при температуре, °С			
	23±3	220	23±3	220
Исходный препрег	<u>950–990</u> 980	<u>850–980</u> 900	<u>67–72</u> 69	<u>52–56</u> 54
2 недели	<u>860–970</u> 930	<u>810–950</u> 870	<u>58–62</u> 61	<u>49–54</u> 51
3 недели	<u>880–1000</u> 920	<u>800–840</u> 830	<u>52–64</u> 60	<u>47–52</u> 49
4 недели	<u>800–880</u> 850	<u>730–840</u> 780	<u>53–63</u> 57	<u>44 - 48</u> 47
5 недель	<u>720–780</u> 740	<u>510–580</u> 550	<u>43–49</u> 46	<u>35 - 39</u> 37
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.				

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

Таблица 7

**Свойства* углепластика на основе бисмаленимидного связующего ВСТ-71,
после хранения препрега при температурах $0 \div 5$ и -18 ± 5 °С**

Условия хранения препрега	Срок хранения, мес.	Прочность при статическом изгибе, МПа		Прочность при межслойном сдвиге, МПа	
		при температуре, °С			
		23±3	220	23±3	220
В исходном состоянии	–	$\frac{950-990}{980}$	$\frac{850-980}{900}$	$\frac{67-72}{69}$	$\frac{52-56}{54}$
В холодильнике при температуре 0÷5 °С	3	$\frac{1000-1100}{1030}$	$\frac{840-960}{890}$	$\frac{58-64}{61}$	$\frac{49-54}{52}$
	4	$\frac{910-950}{920}$	$\frac{790-900}{850}$	$\frac{50-53}{51}$	$\frac{48-53}{50}$
	5	$\frac{810-920}{870}$	$\frac{770-880}{820}$	$\frac{43-47}{44}$	$\frac{41-43}{42}$
	6	$\frac{750-880}{770}$	$\frac{690-830}{700}$	$\frac{39-45}{42}$	$\frac{37-41}{39}$
В морозильной камере при температуре –18±5 °С	3	$\frac{880-1070}{990}$	$\frac{860-900}{880}$	$\frac{65-69}{68}$	$\frac{46-49}{48}$
	4	$\frac{990-1050}{1010}$	$\frac{830-920}{880}$	$\frac{64-70}{68}$	$\frac{44-47}{46}$
	5	$\frac{990-1080}{1040}$	$\frac{810-950}{860}$	$\frac{62-68}{66}$	$\frac{44-46}{45}$
	6	$\frac{850-990}{970}$	$\frac{770-900}{830}$	$\frac{55-60}{57}$	$\frac{40-44}{43}$
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.					

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

Следует отметить, что уровень сохранения прочности углепластика, изготовленного из препрега, хранящегося в помещении, после четырех недель, начинает существенно снижаться и находится на уровне 61–75 % относительно значений исходного препрега. На рис. 4 приведены диаграммы сохранения прочности углепластика после хранения при температуре 20 ± 5 °С при температурах испытаний 23 ± 3 и 220 °С.

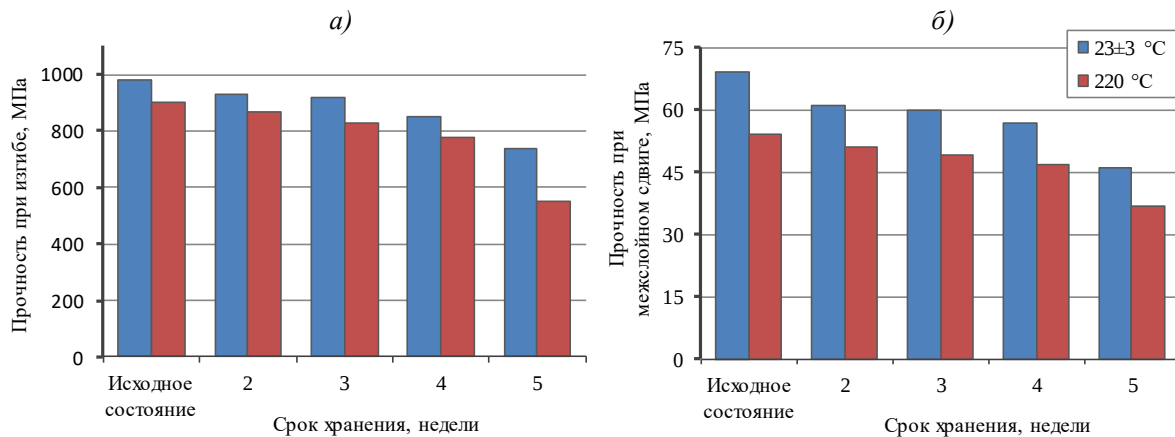


Рис. 4. Прочность при изгибе (а) и межслойном сдвиге (б) углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего после хранения при температуре 20 ± 5 °С

Анализ результатов, представленных в табл. 6, показывает, что сохранение прочности при статическом изгибе и межслойном сдвиге для углепластика, полученного из препрега, хранившегося при температуре 23 ± 3 °С, при повышенной температуре, по средним значениям после четырех недель составляет 92 и 82 %, а после пяти недель – уже 74 и 80 % от исходных значений соответственно, что свидетельствует о хорошем уровне сохранения термостойкости углепластика до четырех недель хранения препрега.

Общий уровень сохранения прочностных свойств для углепластика бисмалеинимидной природы ожидаемо находится ниже в сравнении с другими термостойкими матрицами из-за ухудшения технологических характеристик с течением времени при хранении и, соответственно, снижения качества материала. Тем не менее снижение составляет ≤ 20 % после хранения в течение четырех недель, что в зависимости от эксплуатационных требований к изделию является допустимым и позволяет рекомендовать гарантийный срок хранения при температуре 20 ± 5 °С до четырех недель.

Видно, что уровень сохранения прочности углепластика, изготовленного из препрега, хранящегося в холодильнике, равномерно снижается с увеличением срока хранения и к шести месяцам составляет 60–78 % относительно значений для исходного препрега. В условиях морозильной камеры при том же сроке хранения углепластик имеет значения сохранения прочности 79–98 %, т. е. прочность остается на уровне исходных значений. На рис. 5 и 6 приведены диаграммы сохранения прочности углепластика после хранения в холодильной и морозильной камерах при температурах испытаний 23 ± 3 и 220 °С.

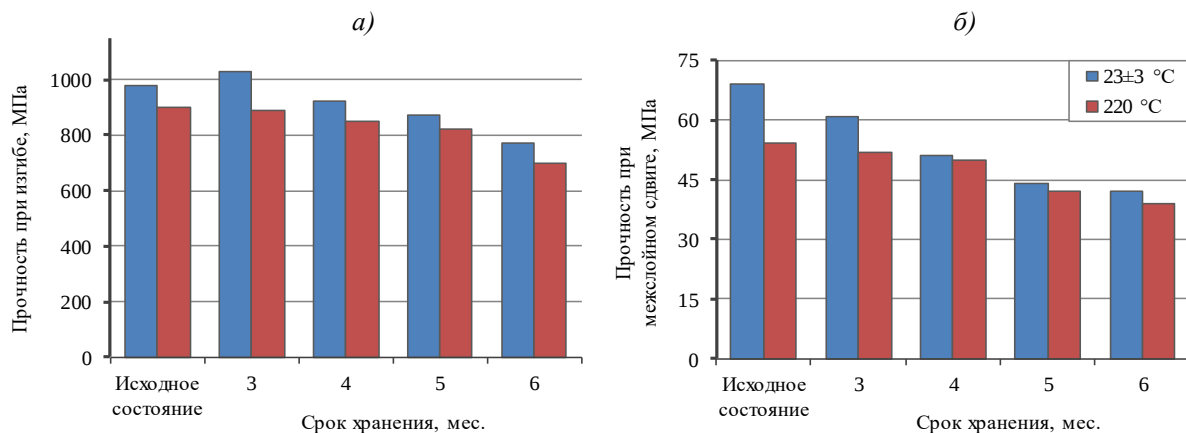


Рис. 5. Прочность при изгибе (а) и межслойном сдвиге (б) углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего после хранения при температуре $0\div 5$ °С

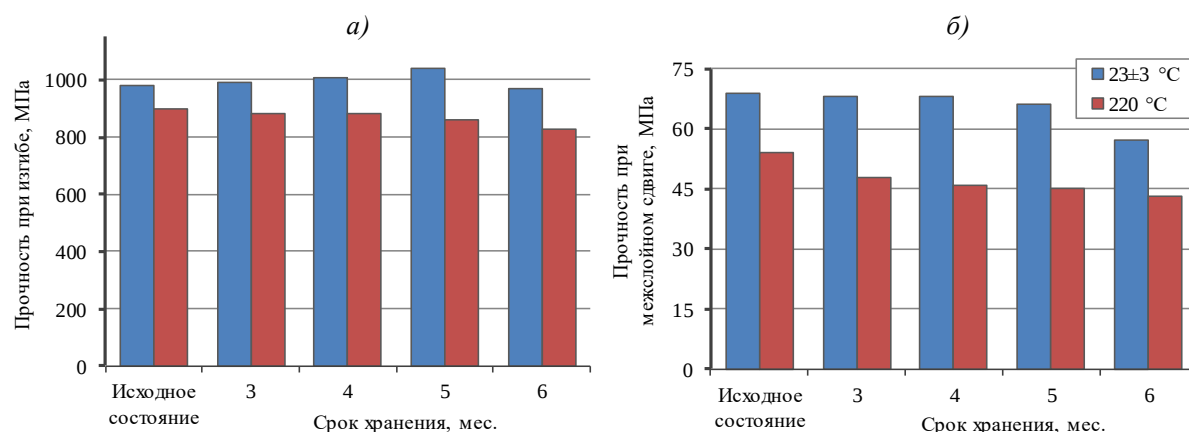


Рис. 6. Прочность при изгибе (а) и межслойном сдвиге (б) углепластика ВКУ-74 на основе бисмалеинимидного связующего после хранения при температуре -18 ± 5 °C

Анализ результатов, представленных в табл. 7, показывает, что сохранение прочности при статическом изгибе и межслойном сдвиге углепластика, полученного из препрега, хранившегося в условиях холодильной и морозильной камер, при повышенной температуре, по средним значениям прочности после шести месяцев хранения остается на уровне не менее 70 %.

Заключения

Таким образом, исходя из полученных данных, можно сделать вывод о допустимых сроках хранения препрега углепластика марки ВКУ-74, изготовленного на основе бисмалеинимидного связующего:

- 4 недели при хранении в помещении при температуре 20 ± 5 °C;
- пять месяцев при хранении в холодильнике при температуре $0 \div 5$ °C;
- шесть месяцев при хранении в морозильной камере при температуре -18 ± 5 °C.

При анализе полученных результатов по хранению препрега в условиях морозильной камеры очевидно, что препрег углепластика марки ВКУ-74 по всем исследуемым параметрам сохраняет неизменно высокий уровень значений, что требует дополнительных исследований для подтверждения возможного увеличения гарантийного срока хранения препрега при температуре -18 ± 5 °C.

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., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
3. 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.
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). С. 122–144. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

5. Iredale R.J., Ward C., Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides // *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 69. P. 1–21.
6. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Смирнов А.В., Бойчук А.С. Влияние метода формования на структуру и свойства углепластика на основе бисмалеинимидного связующего // *Труды ВИАМ*. 2025. № 9 (151). С. 35–49. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.
7. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review // *Thin-Walled Structures*, 2025. Vol. 209. Art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
8. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 43–61. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2026) DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
9. Evsyukov S.E., Pohlmann T., ter Wiel M. Modern approaches to the processing of bismaleimide resins // *Current trends in polymer science*, 2020. Vol. 20. P. 1–28.
10. Bismaleimide Prepreg Systems Market – Global Forecast 2026–2032 // *Researchandmarkets*. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6122216/bismaleimide-prepreg-systems-market-global#src-pos-1> (дата обращения: 18.06.2026).
11. Mosiyuk V., Bukharov S., Baranov A. Manufacture of Molding Tooling Based on TEIS-53 Heat-Resistant Resin // *Key Engineering Materials (Materials Science Forum)*. Switzerland: Trans Tech Publication Ltd., 2022. Vol. 910. P. 351–356. DOI: 10.4028/p-st7n2q.
12. 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). С. 64–81. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 14.05.2026) DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-64-81.
13. 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). С. 99–106. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
14. Гапанькова Е.И., Латышевич И.А. Оценка влияния длительности хранения на свойства препрегов // *Нефтегазохимия-2022: материалы V Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке*. Минск, 2022. С. 88–91.
15. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2014. 400 с.
16. 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.
17. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 719 с.
18. Гусева М.А., Петрова А.П. Возможности реологии при исследовании связующих для ПКМ // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2021. № 7. С. 38–44.
19. 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.
20. Шимкин А.А., Сафронов А.М. Контроль качества полимерных связующих и препрегов методом ДСК // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82. № 8. С. 30–33.
21. Frigione M., Kenny J.M. Effects of storage aging on the cure kinetics of bismaleimide prepregs // *Advances in Polymer Technology*. 2005. Vol. 24. No. 4. P. 253–265. DOI: 10.1002/adv.20048.
22. Томчани О.В., Ворвуль С.В., Хабенко А.В. и др. Исследование свойств расплавленного эпоксидно-бисмалеинимидного связующего и композитов на его основе // *Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. 18-й Междунар. науч.-техн. конф. Обнинск*, 2010. С. 33–36.
23. Связующие бисмалеинимидные // ООО «Итекма». URL: <https://itecma.ru/products/svyazuyushchie/bismaileimidnye-svyazuuyushchie> (дата обращения: 02.06.2026).

24. Prepregs // Hexcel Corporation. URL: <https://www.hexcel.com/products/prepregs-resins/hexply-prepregs> (дата обращения: 02.06.2026).
25. CYCOM-5250-4 TECHNICAL DATA SHEET CYCOM®. URL: <https://hongrunplastics.com/public/uploads/images/20260203/CYCOM%205250-4.pdf> (дата обращения: 02.06.2026).
26. BMI resin // Toray Advanced Composites. URL: https://www.toraytac.com/media/4ac868f6-f136-4b14-92d6-0f777b3a24cf/g6JoSw/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoset/UD%20tapes%20and%20prepregs/RS-8HT_BMI_PDS.pdf (дата обращения: 02.06.2026).
27. RM-3002 Bismaleimide resin. URL: <https://www.lookpolymers.com/pdf/Renegade-Materials-Corporation-RM-3002-Bismaleimide-BMI-Resin-IM7-12K-Carbon-Uni-tape.pdf> (дата обращения: 02.06.2026).

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., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE VIAM in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
3. 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.
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), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Iredale R.J., Ward C., Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides. *Progress in Polymer Science*, 2017, vol. 69, pp. 1–21.
6. Nacharkina A.V., Zelenina I.V., Smirnov A.V., Boychuk A.S. Influence of the molding method on the structure and properties of carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binder. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), pp. 35–49. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 25, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.
7. Xu X., Peng G., Zhang B. et al. Material performance, manufacturing methods, and engineering applications in aviation of carbon fiber reinforced polymers: A comprehensive review. *Thin-Walled Structures*, 2025, vol. 209, art. 112899. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112899.
8. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 43–61. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2026) DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
9. Evsyukov S.E., Pohlmann T., ter Wiel M. Modern approaches to the processing of bismaleimide resins. *Current trends in polymer science*, 2020, vol. 20, pp. 1–28.
10. Bismaleimide Prepreg Systems Market – Global Forecast 2026–2032. *Researchandmarkets*. Available at: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6122216/bismaleimide-prepreg-systems-market-global#src-pos-1> (accessed: June 18, 2026).
11. Mosiyuk V., Bukharov S., Baranov A. Manufacture of Molding Tooling Based on TEIS-53 Heat-Resistant Resin. *Key Engineering Materials (Materials Science Forum)*. Switzerland: Trans Tech Publication Ltd, 2022, vol. 910, pp. 351–356. DOI: 10.4028/p-st7n2q.
12. 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), pp. 64–81. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 14, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-64-81.
13. Chervas 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), pp. 99–106. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 21, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.

14. Gapankova E.I., Latyshevich I.A. Evaluation of the Effect of Storage Duration on the Properties of Prepregs. *Oil and Gas Chemistry-2022: Proceedings of the V Int. Sc. and Tech. Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Refining*. Minsk, 2022, pp. 88–91.
15. Bobovich B.B. *Polymer Structural Materials (Structure, Properties, Application)*. Moscow: FORUM INFRA-M, 2014, 400 p.
16. 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.
17. Mikhailin Yu. A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013, 719 p.
18. Guseva M.A., Petrova A.P. Possibilities of rheology in the study of binders for polymer composite materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 7, pp. 38–44.
19. Veshkin E.A., Postnov V.I., Strelnikov S.V., Abramov P.A., Satdinov R.A. Experience in the Application of Process Control of Semi-finished Products Made of Polymer Composite Materials. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, vol. 16, no. 6 (2), pp. 393–398.
20. Shimkin A.A., Safronov A.M. Quality Control of Polymer Binders and Prepregs by the DSC Method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2016, vol. 82, no. 8, pp. 30–33.
21. Frigione M., Kenny J.M. Effects of storage aging on the cure kinetics of bismaleimide prepregs. *Advances in Polymer Technology*, 2005, vol. 24, no. 4, pp. 253–265. DOI: 10/1002/adv.20048.
22. Tomchani O.V., Vorvul S.V., Khabenko A.V. et al. Study of the properties of melt epoxy-bismaleimide binder and composites based on it. *Designs and technologies for producing products from non-metallic materials: collection of abstracts of reports of the 18th Int. sc. and tech. conf.* Obninsk, 2010, pp. 33–36.
23. *Bismaleimide binders*. Available at: <https://itecma.ru/products/svyazuyushchie/bismailemidnye-svyazuyushchie> (accessed: June 02, 2026).
24. *Prepregs*. Available at: <https://www.hexcel.com/products/prepregs-resins/hexply-prepregs> (accessed: June 02, 2026).
25. *CYCOM-5250-4 TECHNICAL DATA SHEET CYCOM®*. Available at: <https://hongrunplastics.com/public/uploads/images/20260203/CYCOM%205250-4.pdf> (accessed: June 02, 2026).
26. *BMI resin*. Available at: https://www.toraytac.com/media/4ac868f6-f136-4b14-92d6-0f777b3a24cf/g6JoSw/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoset/UD%20tapes%20and%20prepregs/RS-8HT_BMI_PDS.pdf (accessed: June 02, 2026).
27. *RM-3002 Bismaleimide resin*. Available at: <https://www.lookpolymers.com/pdf/Renegade-Materials-Corporation-RM-3002-Bismaleimide-BMI-Resin-IM7-12K-Carbon-Uni-tape.pdf> (accessed: June 02, 2026).

Информация об авторах

Начаркина Анастасия Витальевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Черфас Лилия Васильевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Эльдыева Галина Борисовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Гуныева Анна Георгиевна, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

Galina B. Eldyaeva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 16.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.07.2026.

The article was submitted 16.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 21.07.2026.