

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-84-95

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕПРЕГА УГЛЕПЛАСТИКА ВКУ-39/ВТкУ-2.200

О.Н. Клименко<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, Р.Р. Иваньков<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведена оценка влияния повышенной температуры хранения на реакционную способность препрега углепластика и свойства полимерного композиционного материала на его основе. В качестве объекта исследования рассмотрен препрег углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе расплавленного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии исследованы технологические характеристики препрега. Исследованы свойства углепластика на основе препрега ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии и после хранения в условиях повышенной температуры в течение 5–20 сут.

**Ключевые слова:** препрег, углепластик, углеродная ткань, свойства полимерного композиционного материала, автоклавное формование, условия хранения

**Для цитирования:** Клименко О.Н., Гуляев И.Н., Иваньков Р.Р. Исследование влияния условий хранения на физико-химические и физико-механические характеристики препрега углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-84-95.

Scientific article

## STUDY OF INFLUENCE OF STORAGE CONDITIONS ON PHYSICAL AND CHEMICAL AND PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PREPREG VKU-39/VTkU-2.200

O.N. Klimenko<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<sup>1</sup>, R.R. Ivankov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The study describes impact assessment of elevated storage temperature on reaction capacity of prepreg carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and properties of the polymeric composite material on its basis. Prepreg VKU-39/VTkU-2.200 on the basis of molten epoxy binder VSE-1212 has been chosen as the object of the study. Technological characteristics of prepreps have been studied by methods of differential scanning calorimetry. Properties CFRP based on prepreg VKU-39/VTkU-2.200 in initial condition and after storage in conditions of elevated temperature within 5–20 days are investigated.

**Keywords:** prepreg, carbon fiber, carbon fabric, properties of polymer composite material, autoclave molding, storage conditions

**For citation:** Klimenko O.N., Gulyaev I.N., Ivankov R.R. Study of influence of storage conditions on physical and chemical and physical-mechanical characteristics of prepreg VKU-39/VTkU-2.200. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-84-95.

### Введение

В настоящее время отрасль полимерных композиционных материалов (ПКМ) развивается быстрыми темпами. Количество конструкций из угле- и стеклопластиков увеличивается. Углепластики получили широкое распространение при производстве деталей и конструкций авиационной и космической техники. При изготовлении конструктивных элементов авиационных двигателей и крыльев самолета МС-21 используются ПКМ на основе терморепактивной матрицы и углеродной ткани. Следует отметить, что с каждым годом требования, предъявляемые к физико-механическим и физико-химическим показателям полимерных материалов, ужесточаются [1–3]. Наиболее важными преимуществами ПКМ на основе стеклянных и углеродных тканей являются масса и прочность [4]. Конструкционные детали из ПКМ имеют плотность от 1,5 до 1,7 г/см<sup>3</sup>, в то время как плотность металлов и сплавов составляет  $\geq 2,5$  г/см<sup>3</sup>. Согласно данным работы [5], в самолете МС-21 доля ПКМ достигает 60–65 %, что позволило облегчить конструкцию крыла с применением технологии вакуумной инфузии. В настоящее время ПКМ активно используются для создания беспилотных летательных аппаратов [6–9]. Зачастую для формования изделий и конструкций из углепластика применяют методы вакуумной инфузии и автоклавного формования [9–12].

Препрегом называется полуфабрикат, состоящий из непрерывного армирующего наполнителя, предварительно пропитанного полимерным связующим. Препрег представляет собой материал в виде рулона, в котором для предотвращения склеивания слоев проложена разделительная пленка. Несомненными преимуществами препреговой технологии являются: высокое качество материала, возможность создания сложнопрофильных изделий, различные методы переработки, широкий спектр применения материалов. Препреги на основе эпоксидных связующих являются терморепактивными материалами. Это означает, что химическая реакция их отверждения происходит под воздействием температуры. Однако даже при комнатной температуре в материале могут происходить химические процессы, в том числе частичное отверждение, что в дальнейшем приводит к ухудшению свойств ПКМ. Именно поэтому требуется строгий контроль условий хранения, предусмотренных нормативной документацией на материал.

Одним из приоритетных направлений современного материаловедения является исследование физико-химических и теплофизических характеристик перспективных полимерных композиций с повышенной теплостойкостью, улучшенными деформационно-прочностными свойствами для выбора оптимальных параметров переработки – температуры и давления. Изделия, произведенные из препрегов методом автоклавного формования, обладают комплексом уникальных свойств, так как в процессе переработки обеспечиваются равномерное приложение давления и одинаковая температура воздействия на материал.

Согласно данным работы [13], физико-химические и теплофизические свойства препрегов способны меняться в процессе хранения полуфабриката при комнатной температуре. Это связано с тем, что на препрег углепластика воздействует ряд физических, химических и биологических факторов, в результате чего в полимерном связующем обычно разрываются основные цепи макромолекулы и поперечные связи между ними. Все эти процессы сопровождаются отрывом радикалов и присоединением к ним других атомов, что в дальнейшем отрицательно влияет на физико-химические, физические и механические свойства материала [14–17]. Одним из важных свойств композита в процессе переработки является липкость [15, 18], которую определяют несколькими методами, подробно описанными в статье [19].

Ключевым фактором, влияющим на свойства препрега, является температурный режим хранения. При увеличении температуры хранения выше рекомендованных

значений может произойти нежелательная полимеризация, что приведет к преждевременному отверждению материала. Это, в свою очередь, может негативно сказаться на физико-механических свойствах отвержденного ПКМ, таких как плотность, пористость, прочность при сжатии и межслойном сдвиге, а также на адгезии к другим материалам.

Исследование кинетики процесса отверждения препрегов является важной задачей для технологов и химиков. Для определения физико-химических свойств ПКМ зачастую используется метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Данный метод позволяет измерять изменение теплового потока в образце при контролируемом изменении температуры. Метод ДСК широко применяется для анализа фазовых переходов, реакций отверждения, термической стабильности и других химических процессов, происходящих в материалах, что помогает технологам при разработке и изготовлении деталей из ПКМ [20–22]. Для определения эксплуатационных свойств углепластиков используют метод динамического механического анализа, который применяется для изучения вязкоупругих свойств ПКМ под воздействием температуры, частоты и механических нагрузок. Данный метод позволяет определить температуру стеклования и понять, в какой момент начинают изменяться механические свойства ПКМ под действием повышенной температуры [23–28].

Цель исследования – анализ изменения физико-химических свойств препрега и упруго-прочностных свойств углепластика на его основе при хранении полуфабриката в помещении с повышенной температурой.

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») [29].

#### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран препрег углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 (ТУ 1-595-11-1633–2016) на основе эпоксидного расплавного связующего ВСЭ-1212 (ТУ 1-595-12-1068–2009), предназначенный для применения в конструкции мотогондолы и основных силовых элементов планера, работающих в интервале температур от –60 до +150 °С.

Данный препрег получен на пропиточной установке с автоматизированным управлением и двумя действующими коутерами. Для предотвращения склеивания слоев между собой в качестве антиадгезионной подложки использованы силиконизированная бумага и полиэтиленовая пленка. Следует отметить, что автоматизированное управление линией пропитки позволяет добиться разброса содержания связующего в препреге относительно номинального значения в интервале от 1 до 3 %.

Для проведения исследования осуществлен раскрой препрега на слои размером 100×100 мм, определены характеристики препрега в исходном состоянии. Далее часть образцов хранили в климатических камерах в течение 5, 10, 15 и 20 сут при температуре 25 и 26 °С. Для определения жизнеспособности препрега использовали ДСК-анализ, который широко применяется для исследования реакционной способности материалов. Данный метод зачастую используется для моделирования и коррекции температурно-временного режима процесса отверждения ПКМ. Следует отметить, что ДСК-анализ позволяет контролировать процесс отверждения, выявлять тепловые эффекты, связанные со стеклованием, плавлением и химическим превращением, а также оценивать степень сшивки связующего. При выполнении данной работы использовали высокочувствительный ДСК-анализатор с рабочими температурами от –50 до +400 °С, который снабжен программным обеспечением. Испытания проводили в динамической среде сухого инертного газа – азота, скорость нагрева образцов составляла 10 °С/мин. Для определения физико-химических свойств препрега исследовано по три образца для каждого периода хранения.

Для оценки физико-механических характеристик углепластиков из препрега после хранения в условиях повышенной температуры методом автоклавного формования изготовлены плиты размером 320×320 мм при давлении 0,7 МПа с конечной температурой отверждения 180 °С. Далее плиты подвергали торцовке и дальнейшей разрезке на образцы с помощью алмазного круга с водяным охлаждением.

Упруго-прочностные характеристики образцов углепластиков определяли на высокоточной разрывной машине, которая соответствует требованиям ГОСТ 28840–90 и имеет максимальное усилие 5кН. Образцы испытывали при комнатной температуре (23±2 °С) и относительной влажности 50±10 %.

Для оценки упруго-прочностных характеристик образцов углепластиков использовали следующие методы.

Плотность определяли согласно ГОСТ 15139–69 «Пластмассы и методы определения плотности (объемной массы)». При выполнении испытания использовали дистиллированную воду и аналитические весы с точностью взвешивания до 0,0001 г. При выполнении работы использованы образцы размером 25×25 мм.

Предел прочности и модуль упругости при растяжении определяли согласно ГОСТ Р 56785–2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов». Для определения данных параметров использовали образцы размером 25×250×2,5 мм. Модуль упругости ПКМ определяли с помощью контактного экстензометра.

Предел прочности при сжатии определяли согласно ГОСТ Р 56812–2015 «Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке». Для определения данного параметра использовали образцы размером 12×140×2,5 мм.

Предел прочности и модуль упругости при изгибе определяли согласно ГОСТ Р 57866–2023 «Композиты полимерные. Методы определения механических характеристик при изгибе непрерывно-армированных композитов». Для определения данных параметров использовали образцы размером 13×100×2,5 мм. По значениям прогиба и нагрузке, которая потребовалась для его получения, вычисляли модуль упругости образцов углепластика.

Предел прочности при межслойном сдвиге определяли согласно ГОСТ Р 57745–2017 «Композиты полимерные. Определение предела прочности при межслойном сдвиге ламинатов методом короткой балки». Для определения данного параметра использовали образцы размером 5×15×2,5 мм.

Толщину плиты определяли с помощью толщиномера с точностью измерения 0,001 мм.

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

### Результаты и обсуждение

Изготовленную партию препрега углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 исследовали на соответствие требованиям ТУ 1-595-11-1633–2016. Согласно техническим условиям на препрег, для обеспечения необходимого уровня свойств материала в течение срока годности хранение необходимо осуществлять в герметично упакованном в полиэтиленовую пленку виде при температуре  $-(18\pm 3)$  °С. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Результаты оценки влияния условий хранения препрега на физико-химические и физико-механические характеристики углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 1 и 2.

Таблица 1

**Характеристики препрега углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в исходном состоянии**

Показатель	Требования по ТУ	Фактическое значение показателя
Массовая доля связующего в препреге, %	36±4	35,1–37,3
Поверхностная плотность препрега, г/м <sup>2</sup>	279–350	311–325
Время гелеобразования связующего в препреге при температуре 150±2 °С, мин	25±10	23
Температура начала активной реакции отверждения связующего в препреге (скорость нагрева 10 °С/мин), °С	165±10	171
Температура максимума пика отверждения связующего в препреге, °С	215±10	212
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	105±45	128
Толщина монослоя углепластика, мм	0,19–0,24	0,191–0,195
Плотность углепластика, г/см <sup>3</sup>	1,45–1,60	1,56–1,58
Предел прочности при растяжении углепластика в направлении [0°], МПа (не менее)	750	816
Модуль упругости при растяжении углепластика, ГПа (не менее)	60	63
Предел прочности при изгибе углепластика, МПа (не менее)	750	1032
Модуль упругости при изгибе углепластика, ГПа (не менее)	50	59
Предел прочности при сжатии углепластика, МПа (не менее)	600	745
Предел прочности при межслойном сдвиге углепластика, МПа (не менее)	68	79
Примечание. Упруго-прочностные характеристики образцов углепластика определены при температуре 23±2 °С.		

Таблица 2

**Результаты исследования характеристик препрега углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200**

Условия хранения	Тепловой эффект реакции отверждения связующего в препреге, Дж/г	Температура, °С		Время гелеобразования связующего в препреге при 150±2 °С, мин	
		начала активной реакции отверждения	максимума пика реакции отверждения		
Согласно ТУ 1-595-11-1633–2016	105±45	165±10	215±10	25±10	
В исходном состоянии	128	171	212	23	
Выдержка при температуре 25 °С, сут:	5	133	172	213	24
	10	129	173	212	23
	15	127	173	214	24
	20	124	174	215	24
Выдержка при температуре 26 °С, сут:	5	130	171	214	24
	10	128	173	212	24
	15	126	173	214	24
	20	123	174	215	25

Таблица 3

**Толщина монослоя и плотность отформованных плит углепластика  
марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 из препрега после хранения**

Условия хранения	Толщина монослоя, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Согласно ТУ 1-595-11-1633–2016	0,19–0,24	1,45–1,60
В исходном состоянии	0,194	1,59
Выдержка при температуре 25 °С, сут:		
5	0,195	1,59
10	0,193	1,59
15	0,200	1,58
20	0,205	1,56
Выдержка при температуре 26 °С, сут:		
5	0,191	1,59
10	0,196	1,59
15	0,199	1,57
20	0,201	1,56

Установлено, что хранение препрега при температуре 25–26 °С в течение 20 сут незначительно влияет на реакционную способность связующего ВСЭ-1212 в составе препрега, полученные показатели находятся в рамках диапазонов, допустимых техническими условиями на материал. Следует отметить снижение теплового эффекта реакции отверждения, которое свидетельствует о том, что часть реакционноспособных групп прореагировала с образованием трехмерной сетчатой структуры даже при комнатной температуре. Впоследствии это негативно отразится как на качестве, так и на физико-механических характеристиках углепластика.

Помимо реакционной способности, исследована такая характеристика, как текучесть связующего в препреге. Для этого использован гидравлический пресс и аналитические весы с точностью измерения до 0,0001 г. Результаты определения текучести представлены на рис. 1.

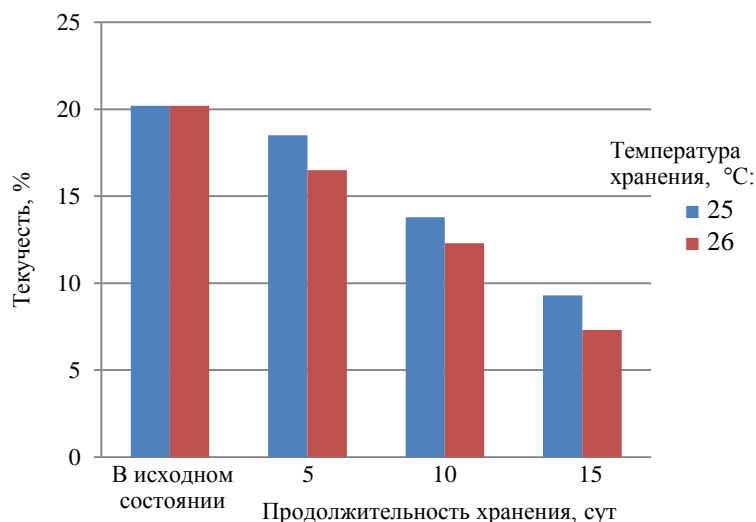


Рис. 1. Изменение текучести связующего ВСЭ-1212 в составе препрега марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в процессе хранения при повышенных температурах

Анализируя данные, приведенные на рис. 1, можно отметить значительное снижение показателя текучести: с увеличением количества дней пребывания препрега в комнатных условиях текучесть уменьшается в 3 раза, минимальное значение показателя

(7 %) получено после 15 сут хранения препрега при температуре 26 °С. Зачастую снижение текучести связующего в препреге вызывает уменьшение липкости и ухудшение драпируемости. Изменение реологических характеристик связующего приводит к изменениям поверхностной плотности пленки связующего, а впоследствии – к образованию неоднородностей на поверхности препрега и отформованного ПКМ.

Результаты определения физико-механических характеристик углепластиков из препрега после хранения в условиях повышенной температуры приведены в табл. 3.

Зафиксированы незначительное снижение плотности и повышение толщины монослоя с увеличением продолжительности хранения препрега при температурах 25 и 26 °С. Характер изменения этих показателей при постоянном значении содержания связующего (от 35,1 до 37,3 %) свидетельствует о том, что в процессе хранения при повышенной температуре молекулярная масса препрега возрастает. Это приводит к увеличению вязкости полимерного связующего, что в дальнейшем влияет на технологические параметры переработки полуфабриката в ПКМ и приводит к снижению качества получаемого пластика.

Физико-механические характеристики образцов углепластика из препрега после хранения приведены на рис. 2.

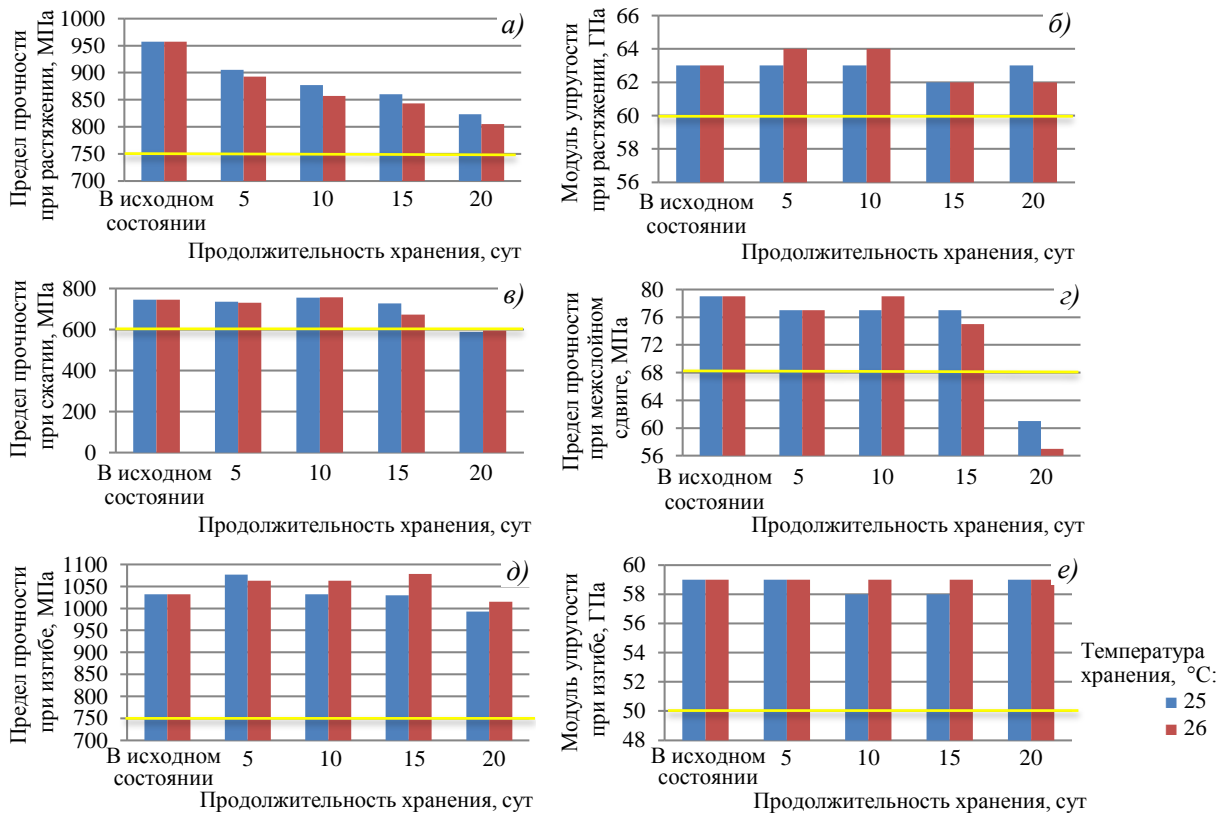


Рис. 2. Изменение предела прочности при растяжении (а), модуля упругости при растяжении (б), предела прочности при сжатии (в), предела прочности при межслойном сдвиге (г), предела прочности при изгибе (д) и модуля упругости при изгибе (е) образцов углепластика из препрега после хранения при повышенной температуре (— уровень свойств согласно техническим условиям)

Отмечена тенденция снижения физико-механических характеристик образцов углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при увеличении температуры и продолжительности хранения препрега. Основное снижение наблюдается для таких показателей, как предел

прочности при сжатии и предел прочности при межслойном сдвиге. Межслоевая прочность – это способность материала сопротивляться расслоению. Таким образом, адгезия имеет основное значение для обеспечения межслоевой прочности ПКМ. При длительном хранении даже при комнатной температуре в препрегах на основе связующего ВСЭ-1212 могут происходить процессы частичного отверждения, что приводит к увеличению вязкости связующего, а в дальнейшем, в процессе формования ПКМ, – к неравномерному распределению связующего в пакете препрега и, как следствие, к получению некачественного пластика с повышенной пористостью и низкой адгезионной прочностью между слоями. Все эти факторы негативно сказываются на прочности при сжатии и межслойном сдвиге, так как данные характеристики зависят от взаимодействия матрицы с армирующим наполнителем.

### Заключения

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Оптимальная температура хранения препрегов на основе связующего ВСЭ-1212 составляет  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при такой температуре процессы старения замедляются, что позволяет сохранить свойства материала на протяжении длительного времени. Хранение и переработка материала при комнатной температуре ограничены значением  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , так как при увеличении температурно-временного диапазона связующее в препреге начинает частично образовывать трехмерную структуру, что приводит к снижению характеристик материала.

Жизнеспособность препрега характеризуется способностью связующего сохранять в течение длительного времени высокоэластичные свойства, обеспечивающие липкость и драпируемость. С увеличением температуры хранения препрегов с течением времени возрастает вязкость связующего, что приводит к снижению текучести, липкости, драпируемости и, как следствие, к неравномерному распределению связующего в пакете препрега при формовании.

Хранение препрега при повышенной температуре длительное время негативно сказывается на качестве углепластика. Так, по результатам исследования установлено, что с увеличением продолжительности и температуры хранения незначительно снижается плотность ПКМ и увеличивается толщина монослоя. Это свидетельствует о том, что в процессе хранения эпоксидная смола и отвердитель в матрице взаимодействуют, частично образуется сетчатая структура полимера, что в дальнейшем не позволяет получить качественный пластик.

Повышенная температура хранения препрега приводит к частичному отверждению матрицы, дегградации связующего и в конечном итоге к ухудшению физико-механических характеристик материала, что негативно сказывается на качестве готовых изделий и увеличивает производственные риски. Соблюдение рекомендаций по хранению препрегов на основе связующего ВСЭ-1212 является критически важным для сохранения упруго-прочностных характеристик и получения высококачественных изделий из ПКМ на их основе.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
3. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.

4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
5. Рыжков В.В., Чернега А.А. Настоящее и будущее полимерных композиционных материалов // *Мат. III Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач Вооруженных Сил Российской Федерации»*. СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2022. С. 354–356.
6. Соколов В.В., Агашина Ж.В., Войнов С.И. и др. Технологическое проектирование углепластиковых деталей со сложной геометрической формой для беспилотных летательных аппаратов // *Пластические массы*. 2022. № 11–12. С. 36–39. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-11-12-36-39.
7. Блинкова Е.В., Зайцев И.А., Плюсин Н.И. Многофункциональные композиты на основе углеродных наноматериалов в полимерной матрице в беспилотном авиастроении // *Военное обозрение*. 2022. № 2 (12). С. 21–24.
8. Зайцев И.А., Спиринов М.С., Москвитина Е.И. Разработка нанокompозитов для улучшения эксплуатационных характеристик корпусов беспилотных летательных аппаратов // *Вестник Военного инновационного технополиса «Эра»*. 2022. Т. 3. № 4. С. 420–423. DOI: 10.56304/S2782375X22040155.
9. Соколов В.В., Войнов С.И., Агашина Ж.В. и др. Особенности технологического проектирования малогабаритных углепластиковых деталей со сложной геометрией, используемых в беспилотных летательных аппаратах // *Полет*. 2021. № 12. С. 54–60.
10. Сотников Е.В., Крееренко С.С. Сравнительный анализ методов автоклавного формования и вакуумной инфузии для изготовления изделий в авиастроении // *Мат. Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы науки и техники»*. Ростов н/Д: Донск. гос. техн. ун-т, 2023. С. 62–63.
11. Дюков В.А. Оптимизация технологического процесса автоклавного формования композитных авиационных конструкций сложной формы с предварительным исправлением их геометрии // *Труды МАИ*. 2021. № 116. С. 12. DOI: 10.34759/trd-2021-116-12.
12. 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: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
13. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2014. 400 с.
14. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Липкость и возможность использования препрегов для автоматизированных технологий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
15. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеяющего связующего в препреге // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
16. Пузырецкий Е.А., Донецкий К.И., Шабалин Л.П., Караваев Р.Ю., Савинов Д.В. Теоретико-экспериментальное исследование вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) и расплавленного эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
17. Терехов И.В., Ткачук А.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения низковязкого эпоксидного связующего ВСЭ-62 с повышенной жизнеспособностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
18. Постнов В.И., Никитин К.Е., Петухов В.И., Бурхан О.Л., Орзаев В.Г. Метод и устройство для определения липкости препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2009. № 3 (12). С. 29–33.

19. Орлов Е.В., Гусев Ю.А., Хрульков А.В., Коротков И.А. Сравнительный анализ методов определения липкости препрега // Труды ВИАМ. 2016. № 7 (43). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9.
20. Антифеева Н.В., Старков А.И. Влияние содержания галогеносодержащего олигомера в составе клеевого связующего на кинетику процесса отверждения препрегов // Мат. VI Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 198–216.
21. Мараховский П.С., Антифеева Н.В., Большаков В.А. Практическое применение термического анализа при разработке и исследовании полимерных композиционных материалов // Мат. XII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения». М.: ВИАМ, 2020. С. 310–325.
22. Кожевникова Ю.М., Толмачева И.Г., Капустина П.В. и др. Оптимизации температурно-временных режимов изготовления углепластиков на основании расчета кинетических параметров процесса отверждения связующих // Сб. докл. XX науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2023. С. 332–338. DOI: 10.53403/9785951505460\_332.
23. Косенко Е.А. Исследование деформационных свойств композитов с гибридной матрицей методом динамического механического анализа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 81–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-81-89.
24. Сорокин В.О., Наумов А.В., Шкодич В.Ф., Ахмадуллин Р.М. Разработка углепластиков на основе полифениленсульфида // Мат. XI Междунар. конф. «Полимерные материалы пониженной горючести». Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2023. С. 150–152.
25. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Лебедев М.П. Исследование эпоксидангидридного связующего с наполнителями углеродных нанотрубок и карбида кремния методами рентгеноструктурного и динамического механического анализа // Вестник Томского государственного университета. Сер.: Химия. 2023. № 32. С. 144–163. DOI: 10.17223/24135542/32/11.
26. Тимошкин И.А., Алешкевич В.В., Афанасьева Е.С. и др. Термостойкие углепластики с матрицами на основе сополимера бис-фталонитрилов и бис-бензонитрила // Высокомолекулярные соединения. Сер.: С. 2020. Т. 62. № 2. С. 174–185. DOI: 10.31857/S2308114720020156.
27. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
28. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
29. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

#### References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.
2. Kablov E.N. New generation materials are the basis for innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
3. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-flammable polyimide glass fiber laminates for aviation and rocket technology products. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
4. Kablov E.N. Composites: Today and Tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.

5. Ryzhkov V.V., Chernega A.A. The Present and Future of Polymer Composite Materials. *Proc. III All-Russian Scientific and Practical Conf. «Problems of Creation and Application of Spacecraft and Launch Vehicle Systems in the Interests of Solving the Tasks of the Armed Forces of the Russian Federation»*. St. Petersburg: A.F. Mozhaisky Military Space Academy, 2022, pp. 354–356.
6. Sokolov V.V., Agashina Zh.V., Voynov S.I. et al. Technological Design of Carbon Fiber Parts with Complex Geometric Shapes for Unmanned Aerial Vehicles. *Plasticheskie massy*, 2022, no. 11–12, pp. 36–39. DOI: 10.35164/0554-2901-2022-11-12-36-39.
7. Blinkova E.V., Zaitsev I.A., Plyusnin N.I. Multifunctional composites based on carbon nanomaterials in a polymer matrix in unmanned aircraft construction. *Voennoe obozrenie*, 2022, no. 2 (12), pp. 21–24.
8. Zaitsev I.A., Spirin M.S., Moskvitina E.I. Development of nanocomposites to improve the performance characteristics of unmanned aerial vehicle bodies. *Vestnik Voennogo innovatsionnogo tekhnopolisa «Era»*, 2022, vol. 3, no. 4, pp. 420–423. DOI: 10.56304/S2782375X22040155.
9. Sokolov V.V., Voynov S.I., Agashina Zh.V. et al. Features of the technological design of small-sized carbon fiber parts with complex geometry used in unmanned aerial vehicles. *Polet*, 2021, no. 12, pp. 54–60.
10. Sotnikov E.V., Kreerenko S.S. Comparative analysis of autoclave molding and vacuum infusion methods for the manufacture of products in the aircraft industry. *Proc. All-Rus. (National) Scientific and Practical Conf. «Actual Problems of Science and Technology»*. Rostov-on-Don: Donsk. state tech. univ., 2023, pp. 62–63.
11. Dyukov V.A. Optimization of the technological process of autoclave molding of composite aircraft structures of complex shape with preliminary correction of their geometry. *Trudy MAI*, 2021, no. 116, p. 12. DOI: 10.34759/trd-2021-116-12.
12. 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: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-1-99-106.
13. Bobovich B.B. *Polymer structural materials (structure, properties, application)*. Moscow: FORUM INFRA-M, 2014, 400 p.
14. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Stickiness and possibility of using prepreps for automated technologies (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
15. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
16. Puzyretskiy E.A., Donetskii K.I., Shabalin L.P., Karavaev R.Yu., Savinov D.V. Theoretical and experimental study of the vacuum forming of semipreps based on carbon fillers (tapes and fabric) and melting epoxy binding. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
17. Terekhov I.V., Tkachuk A.I., Donetskii K.I., Karavaev R.Yu. Technological and operational characteristics of the VSE-62 low-viscosity epoxy resin with increased pot life and its application. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
18. Postnov V.I., Nikitin K.E., Petukhov V.I., Burkhan O.L., Orzaev V.G. Method and device for determining the stickiness of prepreps. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2009, no. 3 (12), pp. 29–33.
19. Orlov E.V., Gusev Yu.A., Khrulkov A.V., Korotkov I.A. Comparative analysis of stickiness determination methods of prepreg. *Trudy VIAM*, 2016, no. 7 (43), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9.
20. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. Effect of the content of halogen-containing oligomer in the adhesive binder on the kinetics of the prepreg curing process. *Proc. VI All-Rus. scientific and technical conf. «Polymer composite materials and production technologies of the new generation»*. Moscow: National Research Center «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022, pp. 198–216.

21. Marakhovsky P.S., Antyufeeva N.V., Bolshakov V.A. Practical application of thermal analysis in the development and study of polymer composite materials. *Proc. XII All-Rus. conf. on testing and research of materials properties «TestMat» on the topic «Modern aspects in the field of research of structural and phase transformations in the creation of new generation materials»*. Moscow: VIAM, 2020, pp. 310–325.
22. Kozhevnikova Yu.M., Tolmacheva I.G., Kapustina P.V. et al. Optimization of temperature-time modes of carbon fiber-reinforced plastics manufacturing based on the calculation of kinetic parameters of the binder curing process. *Coll. reports XX scientific-technical. conf. «Youth in Science»*. Sarov: RFNC – VNIIEF, 2023, pp. 332–338. DOI: 10.53403/9785951505460\_332.
23. Kosenko E.A. Study of deformation properties of composites with a hybrid matrix by the method of dynamic mechanical analysis. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2021, no. 10, pp. 81–89. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-81-89.
24. Sorokin V.O., Naumov A.V., Shkodich V.F., Akhmadullin R.M. Development of carbon fiber reinforced plastics based on polyphenylene sulfide. *Proc. XI Int. Conf. «Polymer Materials of Low Flammability»*. Volgograd: Volgograd State Tech. Univ., 2023, pp. 150–152.
25. Kychkin A.A., Kychkin A.K., Lebedev M.P. Study of epoxy anhydride binder with carbon nanotube and silicon carbide fillers by X-ray diffraction and dynamic mechanical analysis. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Khimiya*, 2023, no. 32, pp. 144–163. DOI: 10.17223/24135542/32/11.
26. Timoshkin I.A., Aleshkevich V.V., Afanasyeva E.S. et al. Heat-resistant carbon fiber reinforced plastics with matrices based on a copolymer of bis-phthalonitriles and bis-benzonitrile. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: S*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 174–185. DOI: 10.31857/S2308114720020156.
27. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 22, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
28. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
29. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

#### *Информация об авторах*

**Клименко Оксана Николаевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Иваньков Роман Русланович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### *Information about the authors*

**Oksana N. Klimenko**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head for Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Roman R. Ivankov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.07.2025.  
The article was submitted 10.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 11.07.2025.