

---

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49

## ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ФОРМОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ БИСМАЛЕИНИМИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

А.В. Начаркина<sup>1</sup>, И.В. Зеленина<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>, А.С. Бойчук<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.** Проведено исследование структуры и физико-механических характеристик высокотемпературного углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, полученного различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным. Приведены результаты исследований полученных образцов методами неразрушающего контроля, такими как ультразвуковой эхо-импульсный метод и метод рентгеновской компьютерной томографии, которые позволили количественно оценить пористость. Проведено также сравнение прочностных характеристик и уровня их сохранения при повышенных температурах испытаний.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ), бисмалеинимидные углепластики, методы формования, структура, пористость, неразрушающие методы контроля

**Для цитирования** 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). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.

Scientific article

## INFLUENCE OF THE MOLDING METHOD ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS BASED ON BISMALLEINIMIDE BINDER

A.V. Nacharkina<sup>1</sup>, I.V. Zelenina<sup>1</sup>, A.V. Smirnov<sup>1</sup>, A.S. Boychuk<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 article presents the study of the structure, physical and mechanical properties of high-temperature carbon fiber based on bismalleinimide binder, obtained by various methods of molding: autoclave, press and vacuum. The study results of samples obtained by non-destructive testing methods, such as ultrasonic echo-pulse method and X-ray computed tomography method, which allowed to estimate quantitative values of porosity. Also, the comparison of strength characteristics and the level of their preservation at elevated test temperatures have been conducted.

**Keywords:** polymer composite materials (PCMs), bismalleinimide carbon fiber reinforced plastics, molding methods, structure, porosity, non-destructive testing methods

**For citation:** 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 bismalleinimide binder. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-35-49.

### Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) составляют >50 % в конструкциях гражданских самолетов последнего поколения. Их широкое распространение в такой сложной области, как авиационная, объясняется множеством преимуществ, которыми они обладают [1, 2], – первую очередь, низкой плотностью, что позволяет облегчить конструкции, при этом повысить производительность и снизить расход топлива. Кроме того, ПКМ устойчивы к усталостным нагрузкам и коррозии. Детали из ПКМ могут изготавливаться из заготовок, форма которых очень близка к их окончательной форме. Это снижает потребность в механической обработке и уменьшает потери материала, позволяя таким образом получать достаточно большие элементы, что уменьшает количество соединений (клепки или болты) в конструкции.

Одно из направлений развития применения ПКМ в авиационных конструкциях касается введения деталей из них в горячие зоны, где они должны выдерживать высокие температуры в течение всего срока эксплуатации. Среди высокотемпературных материалов, удовлетворяющих этому критерию, ПКМ на основе полиимидных, бисмалеинимидных, фталонитрильных и других термостойких связующих нашли применение в авиационных конструкциях, в том числе в элементах мотогондол двигателей, эксплуатируемых при повышенных температурах от 200 до 350 °С [3–6].

Несмотря на то что активное использование композиционных материалов привело к динамичному развитию их массового производства, снижению стоимости сырья и расходных материалов, ПКМ с высокими эксплуатационными характеристиками остаются довольно дорогостоящими в производстве.

Самым распространенным методом изготовления изделий из ПКМ изначально являлся прямой прессовый, который реализуется на специальных прессах (главным образом гидравлических или реже – пневматических) в обогреваемых пресс-формах. С развитием технологий на смену прессовому методу формования пришло автоклавное. В настоящее время в большинстве коммерческих самолетостроительных компаний для производства композиционных конструкций используются автоклавы, которые могут обеспечить высокие давление, вакуум и конечные температуры при изготовлении изделий из ПКМ [7, 8]. Полученные таким методом изделия, как правило, обладают низкой пористостью и высоким уровнем физико-механических свойств, но для этого необходимы повышенные капиталовложения в оборудование, а также высокие эксплуатационные расходы. Альтернативой являются безавтоклавные технологии, которые позволяют снизить затраты на производство изделий из ПКМ и изготавливать изделия с использованием только давления вакуума для обеспечения низкопористой структуры таких материалов, тем самым устраняя необходимость покупки и эксплуатации дорогостоящих прессов или автоклавов [9–11]. Следует учитывать, что для данного метода связующее должно обладать необходимыми реологическими характеристиками и способностью формировать структуру матрицы без избыточного давления.

Углепластики на основе бисмалеинимидных связующих – перспективный класс высокотемпературных ПКМ, демонстрирующих стабильную работоспособность в температурном диапазоне 200–250 °С. Матрица бисмалеинимидного углепластика характеризуется высокой степенью сшивки, что определяет термическую стабильность и высокие показатели механических характеристик материала.

Широкое применение бисмалеинимидных связующих объясняется несколькими факторами. Во-первых, компоненты для их производства легкодоступны и разнообразны. Во-вторых, их можно модифицировать различными компонентами, улучшая свойства или добавляя новые характеристики. Благодаря этим преимуществам бисмалеинимидные связующие и материалы на их основе нашли применение во многих промышленных областях.

Технологические особенности этих материалов делают их удобными в производстве. Они обладают хорошей текучестью даже при относительно низких температурах обработки и не образуют побочных продуктов при отверждении. Это позволяет использовать различные методы формования: от традиционного автоклавного процесса с применением препрега до альтернативных технологий. Для производства ПКМ без использования автоклава (например, с помощью вакуумной инфузии) создаются специализированные бисмалеинимидные композиции, адаптированные для конкретных технологических процессов [12–19].

Данная статья посвящена исследованию свойств высокотемпературного углепластика на основе бисмалеинимидного связующего и равнопрочной углеродной ткани, а также сравнению характеристик углепластика, изготовленного различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

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

### Материалы и методы

Объекты исследования – образцы углепластика из препрега на основе термореактивного бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 расплавного типа и равнопрочной углеродной ткани марки ВТкУ-5 с поверхностной плотностью  $200 \pm 10$  г/м<sup>2</sup>, изготовленные различными методами формования.

Для термического анализа препрега использовали методы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) по ГОСТ Р 56755–2015 и термомеханического анализа (ТМА) по ММ 1.595-11-138–2005.

Неразрушающий контроль [20] плит углепластика проводили на ультразвуковой иммерсионной установке при использовании фокусированного иммерсионного преобразователя с центральной частотой 5 МГц, диаметром пьезопластины 0,5 дюйма (1,27 см) и фокусным расстоянием 1,5 дюйма (3,81 см), а также методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ).

Определение температуры стеклования образцов углепластика проводили по ГОСТ Р 56753–2015 методом динамического механического анализа в режиме трехточечного изгиба в атмосфере аргона, со скоростью нагревания 5 °С/мин и при осциллирующей нагрузке с частотой 1 Гц.

По методу гидростатического взвешивания по ГОСТ Р 57713–2017 определяли плотность образцов углепластика, а по ГОСТ Р 56682–2015 (метод 2) – толщину монослоя и массовую долю связующего.

Объемную долю пор в углепластике определяли несколькими методами: с помощью РКТ согласно ТР 1.2.2883–2020, а также расчетным методом, исходя из весового содержания и плотности связующего ( $C_{св}$ , %;  $\rho_{св}$ , г/см<sup>3</sup>) и наполнителя ( $C_n$ , %;  $\rho_n$ , г/см<sup>3</sup>) по формуле:

$$П = 100 - V_{св} - V_n,$$

где  $V_{св}$  – объемное содержание связующего, % ( $V_{св} = \frac{\rho_{углепластик}}{\rho_{наполнитель}} C_{св}$ );  $V_n$  – объемное содержание

наполнителя, % ( $V_n = \frac{\rho_{углепластик}}{\rho_{наполнитель}} C_n$ ).

Определение механических характеристик проводили при испытаниях на растяжение (ГОСТ Р 56875–2016), сжатие (ГОСТ Р 56812–2015), изгиб (ГОСТ Р 56805–2015) и межслойный сдвиг (ГОСТ 32659–2014) при комнатной  $23 \pm 3$  °С и повышенных (220 и 250 °С) температурах.

### Результаты и обсуждение

Для сравнительной оценки различных способов формования (автоклавный, прессовый, вакуумный) по расплавной технологии на пропиточной машине изготовили две партии препрега на основе терморезактивного бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 и равнопрочной углеродной ткани марки ВТкУ-5. Из полученного препрега, используя различные способы формования, изготовлены образцы углепластика ВСТ-71/ВТкУ-5 для проведения дальнейших исследований.

Для определения основных температурно-временных параметров формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего методами термического анализа проведено исследование реакционной активности связующего в составе препрега – определены параметры отверждения связующего (методом ДСК) и время гелеобразования (методом ТМА). Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Реакционная активность связующего в составе препрега углепластика ВТкУ-5/ВСТ-71**

Характеристика	Значения характеристик
Температурный интервал отверждения, °С	
– начало	110±10
– окончание	290±10
Температура начала активной реакции отверждения, °С	135±10
Температура пика реакции отверждения, °С (пик ДСК)	255±5
Нормированный тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	140±15
Время гелеобразования связующего в препреге, мин (после температуры 120 °С в течение 60 мин)	7,0±0,5

Исследованный методами ДСК и ТМА процесс отверждения бисмалеинимидного связующего ВСТ-71 в составе препрега, протекающий в интервале температур от 110±10 до 290±10 °С, позволяет реализовать отверждение углепластика на его основе любым способом формования – как прессовым, так и автоклавным или вакуумным. Исходя из полученных данных реакционной активности связующего в составе препрега, определены основные температурно-временные параметры формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71, составлены и опробованы различные режимы изготовления плит углепластика, отличающиеся температурно-временными параметрами стадий отверждения, временем и температурой подачи давления и обусловленные типом применяемого оборудования (автоклав, пресс, вакуумный шкаф).

Для дальнейших исследований отобраны плиты углепластика, полученного различными способами формования, с одинаковой массовой долей связующего 33,5–34,0 % и толщиной монослоя 0,203–0,205 мм.

На рис. 1 представлено оборудование, используемое для изготовления углепластиков, а также показана сборка пакетов углепластика, отличающихся тем, что в прессовом методе собирается простой однослойный пакет, упакованный в высокотемпературную пленку, а для автоклавного и вакуумного методов собирается герметичный вакуумный мешок с дополнительным дренажным слоем:

– автоклав на рабочую температуру до 250 °С и собранный герметичный вакуумный пакет препрега углепластика с дренажным слоем и с подключенными штуцерами на столе в автоклаве;

– пресс гидравлический на рабочую температуру до 250 °С и собранный пакет препрега углепластика между обогреваемыми плитами пресса;

– термошкаф на рабочую температуру до 250 °С и собранный герметичный вакуумный пакет препрега углепластика с дренажным слоем со штуцерами, подключенными к вакуумному насосу.

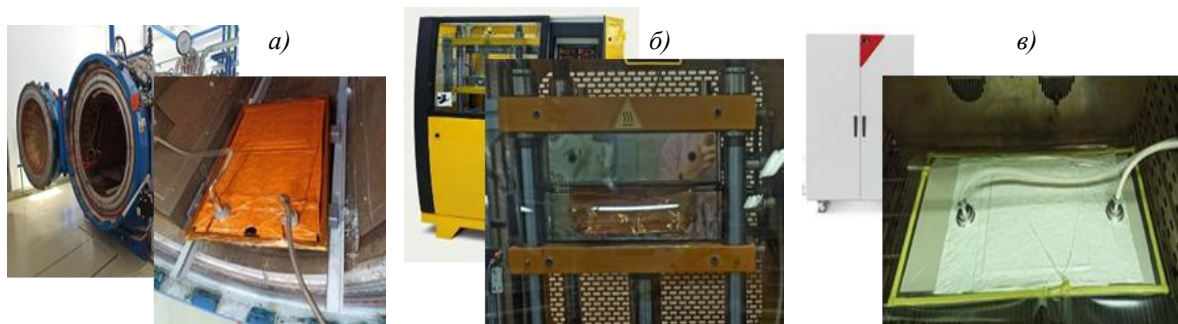


Рис. 1. Оборудование и пакеты препрега углепластика при формировании автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами

При производстве ПКМ нередко возникают различные изъяны, которые классифицируются по размеру на три основные категории: микро-, мини- и макродефекты.

Микродефекты представляют собой структурные нарушения, линейные размеры которых находятся в том же порядке величины, что и поперечные размеры армирующих волокон. Данная категория включает микротрещины, мелкие пустоты, посторонние включения, нарушения структуры матрицы между отдельными волокнами.

Минидефекты (разориентация волокон, искривления, вмятины, царапины и т. п.) и макродефекты (трещины, надрезы, раковины и т. п.) достаточно легко обнаруживать при помощи стандартного ультразвукового контроля либо визуально, если они расположены на поверхности материала. Одним из распространенных дефектов в ПКМ (в частности, в углепластике) является пористость, относящаяся к микродефектам и отрицательно влияющая на упруго-прочностные свойства, особенно на устойчивость к сжатию и прочность при межслойном сдвиге [21].

Наиболее часто встречающийся микродефект – пористость, ухудшающая прочностные свойства материала, которая представляет собой разного размера пустоты, образующиеся по различным причинам: будь то плохо удаленный при пропитке воздух или влага из межволоконного или межнитевого пространства наполнителя, наличие летучих продуктов, образовавшихся при пропитке или последующем отверждении связующего. Наличие или отсутствие пористости напрямую зависит от технологии переработки препрега [22].

Плиты углепластика, полученного различными методами формирования, исследовали при помощи неразрушающего метода контроля – ультразвукового эхоимпульсного метода [23, 24]. По результатам контроля получены карты амплитуд донных эхо-сигналов (С-сканы), где цвету от фиолетового до красного соответствует амплитуда эхо-сигнала от 0 до 100 % (рис. 2).

По результатам неразрушающего контроля установлено, что все представленные методы формирования позволяют получить образцы углепластика без дефектов и нарушений структуры. Однако по изображениям С-сканов можно видеть и отличия полученных плит. По переходу цвета от красного к синему (рис. 2, в) наблюдается уменьшение амплитуды сигнала, что позволяет судить об увеличении пористости по краям плиты углепластика, полученного с помощью вакуумного метода формирования. В данном методе отсутствует внешнее давление, которое равномерно распределяется по площади, как в случае автоклавного и прессового метода формирования.

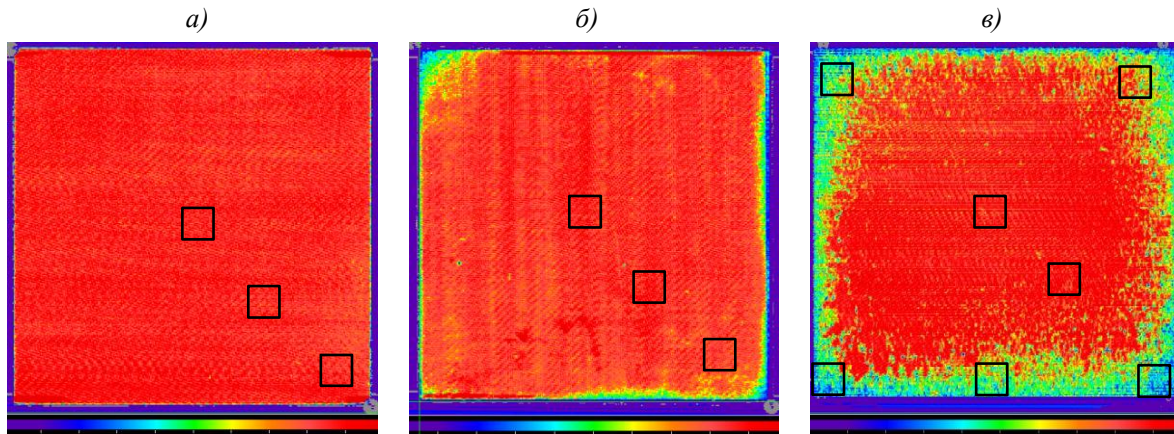


Рис. 2. С-сканы плит углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами формования

Ультразвуковым эхо-импульсным методом можно качественно оценить исследуемый материал и (или) обнаружить дефекты структуры. Для количественной оценки пористости использован метод РКТ для определения объемной доли пористости [25–27]. Для этого на полученных С-сканах (рис. 2) выбраны несколько зон размером 30×30 мм с разными значениями амплитуд донных эхо-сигналов, изготовлены соответствующие образцы, на которых проведено определение фактической объемной доли пористости расчетным методом (табл. 2).

Таблица 2

**Пористость углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, полученного автоклавным, прессовым и вакуумным методами формования, определенная методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)**

Способ изготовления	Исследуемая зона по С-скану	Томограмма поперечного сечения	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Объемная доля пор, %	
				расчетная	по данным РКТ
Автоклавное формование			1,557	0,03–0,05	0
Прессовое формование			1,556	0,08–0,12	0,01
Вакуумное формование			1,555	0,07–0,10	0,08
			1,553	1,22–1,34	1,52
			1,552	1,36–1,62	1,84
			1,548	2,08–2,31	2,83

Уникальность метода РКТ состоит в том, что при контроле исследуемых образцов повышается информативность результатов контроля, появляется возможность проводить оценку объемной доли пористости как на отдельных участках, так и по всему объему объекта контроля (исследуемых образцов углепластиков). В результате проведения РКТ получают объемную трехмерную модель исследуемого объекта посредством сшивания в единый массив множества проекций.

Проведение РКТ и оценку объемной доли пористости в вырезанных образцах углепластика осуществляли в соответствии с ТР 1.2.2883–2020 на рентгеновском компьютерном томографе. На рис. 3 представлены томограммы поперечного сечения образцов углепластика на основе препрега ВСТ-71/ВТкУ-5, полученного автоклавным, прессовым и вакуумным методами формования.

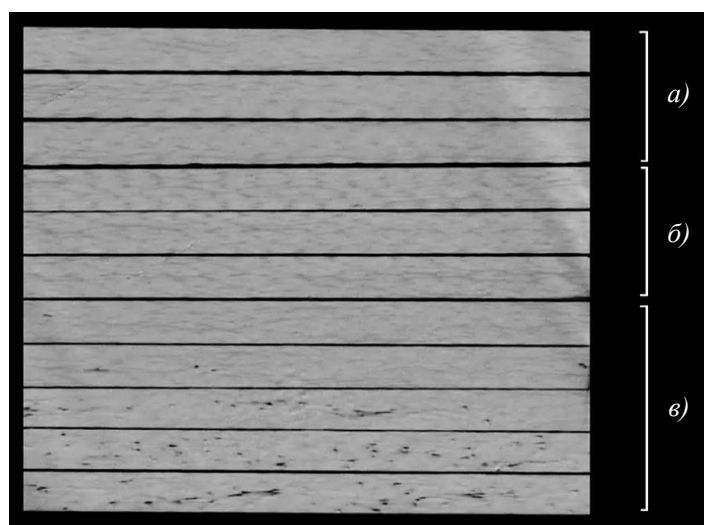


Рис. 3. Томограммы поперечного сечения образцов углепластика из препрега ВСТ-71/ВТкУ-5, полученного автоклавным (а), прессовым (б) и вакуумным (в) методами формования

Один из этапов обработки томограмм – получение значений среднего уровня серого и стандартного отклонения. В каждом образце выбирали фрагмент как без дефектов, так и с наибольшим количеством наиболее часто встречающихся дефектов, который подвергали статистическому анализу.

По результатам РКТ определили, что значения объемной доли пористости в исследуемых объектах контроля напрямую зависят от метода получения образцов углепластика. На рис. 4 представлены изображения поперечного сечения томограмм образцов, на которых прослеживается изменение плотности распределения пор в зависимости от метода получения образцов углепластика.

При сравнении результатов, представленных в табл. 2, выявлено, что плотность образцов углепластика, полученных различными методами (образцы отобраны в красной зоне на С-скане), отличаются незначительно, пористость при этом минимальная <math><0,1\%</math> (по данным РКТ) и не больше 0,12 % (полученная расчетным способом).

Различия при определении пористости расчетным методом и методом РКТ можно объяснить тем, что для увеличения точности подсчет пористости методом РКТ осуществляли на образцах гораздо меньшего размера (10×5 мм). Несмотря на отличия в значениях пористости, полученных расчетным методом и определенных по томограммам образцов, существует общая корреляция между ними, а также с результатами, полученными при исследовании плит углепластика с помощью ультразвукового контроля.

Несмотря на видимый краевой эффект, наблюдаемый при вакуумном формовании и не превышающий 20 мм по периметру плиты (рис. 2, в), где наблюдается увеличенная доля пористости, можно говорить о пригодности данного метода формования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71, так как существуют различные технологические приемы для устранения данного эффекта [28–31].

Проведены также исследования температуры стеклования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71, изготовленного разными методами формования. На рис. 4 приведены термограммы углепластика.

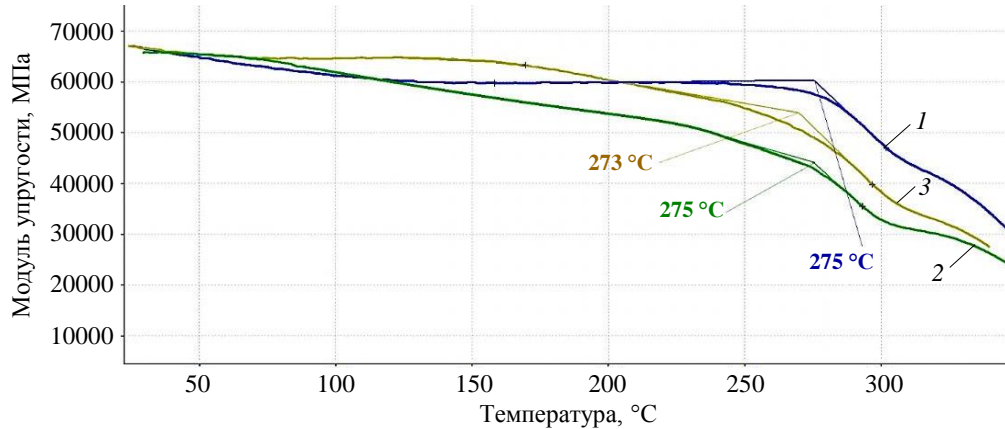


Рис. 4. Термограммы динамического механического анализа углепластиков, изготовленных автоклавным (1), прессовым (2) и вакуумным (3) методами формования

Видно, что температура стеклования углепластика на основе бисмалеинимидного связующего марки ВСТ-71 практически не зависит от способа формования и составляет 273–275 °С.

Другим немаловажным свойством любого материала, характеризующим его структуру и зависящим от технологии изготовления, является устойчивость к воде и влаге. Особенно это важно для полимеров, чувствительных к воздействию влаги, к которым относятся бисмалеинимидные композиции [32, 33]. На рис. 5 приведены данные водопоглощения углепластиков на основе связующего марки ВСТ-71, изготовленных разными методами формования.

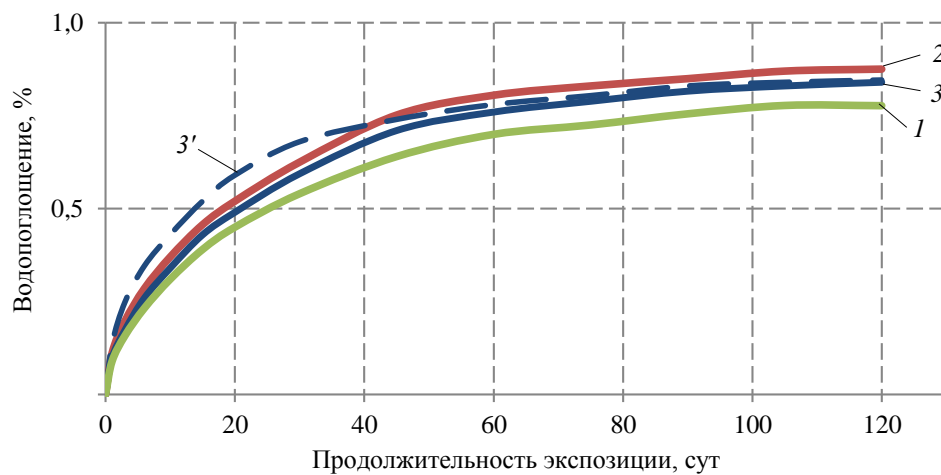


Рис. 5. Водопоглощение углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавным (1), прессовым (2) и вакуумным (3, 3') методами формования

Равновесное водопоглощение достигается через 60–70 сут. У углепластиков, полученным автоклавным методом, водопоглощение составило 0,78 %, прессовым методом 0,88 %, а вакуумным 0,83 %. Характер кривых показывает, что скорость поглощения воды у образцов, полученных разными методами, практически одинаковая. В течение первых 25 сут наблюдается наибольшая скорость водонасыщения, которая составляет 0,5–0,6 %. Отдельно следует отметить образцы, полученные вакуумным методом, отобранные с края плиты с повышенной пористостью. Несмотря на пористость, равновесное водопоглощение для данных образцов составляет 0,84 %, а повышенная пористость влияет только на начальную скорость водопоглощения, что видно по характеру кривой (рис. 5, кривая 3').

Все три метода формования позволяют получить углепластик достаточно высокого качества, что также подтверждают результаты исследования прочностных характеристик углепластика, полученного разными методами, которые представлены в табл. 3 и на рис. 6.

Таблица 3

**Механические свойства углепластиков на основе бисмаленимидного связующего, полученного прессовым, автоклавным и вакуумным методами формования**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств для углепластика, полученного методом формования		
		автоклавным	прессовым	вакуумным
Предел прочности при растяжении, МПа	23±3	875	870	865
	220	890	880	865
	250	880	870	860
Модуль упругости при растяжении, ГПа	23±3	76	76	73
Предел прочности при сжатии, МПа	23±3	750	780	735
	220	580	580	570
	250	520	–	–
Предел прочности при изгибе, МПа	23±3	1120	1150	1130
	220	1010	970	990
	250	900	870	890
Модуль упругости при изгибе, ГПа	23±3	76	70	65
	220	78	73	68
	250	79	72	66
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	23±3	72	65	57
	220	50	43	36
	250	45	–	–

По результатам исследования прочностных характеристик установлено, что образцы углепластика, полученного различными методами, находятся на одном уровне по прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Разброс значений прочности образцов углепластика, полученного разными методами, при температуре испытаний 23±3 °С составляет не более 6 %, что не считается значительной разницей и входит в допустимый разброс значений в выборке для испытаний. Следует отметить отличия, полученные в значениях прочности при межслойном сдвиге: наилучшие результаты показывают образцы, изготовленные автоклавным методом формования. Образцы, полученные вакуумным методом, по значениям прочности при сдвиге уступают образцам, изготовленным автоклавным методом – на 21 %, а прессовым методом – на 12 %.

На рис. 6 приведены диаграммы сравнения прочностных характеристик углепластика, полученного разными методами формования, а также уровень сохранения прочности при повышенной температуре испытаний 220 °С.

По значениям сохранения прочности при повышенной температуре испытаний углепластики находятся на одном уровне независимо от метода получения. Разброс сохранения прочности при температуре 220 °С составляет не более 6 %. Учитывая уровень сохранения прочностных характеристик при повышенной температуре испытаний, можно сделать вывод, что свойства бисмалеинимидной матрицы реализованы в углепластиках независимо от метода формования. Сохранение прочности при растяжении при температуре испытаний 220 °С составляет 100 %, а при статическом изгибе 84–90 %. Такие характеристики, как сжатие и межслойный сдвиг, которые в большей степени характеризуют уровень термостойкости именно матрицы в образцах углепластика, показали сохранение прочности при сжатии 74–78 %, а при межслойном сдвиге 63–69 %.

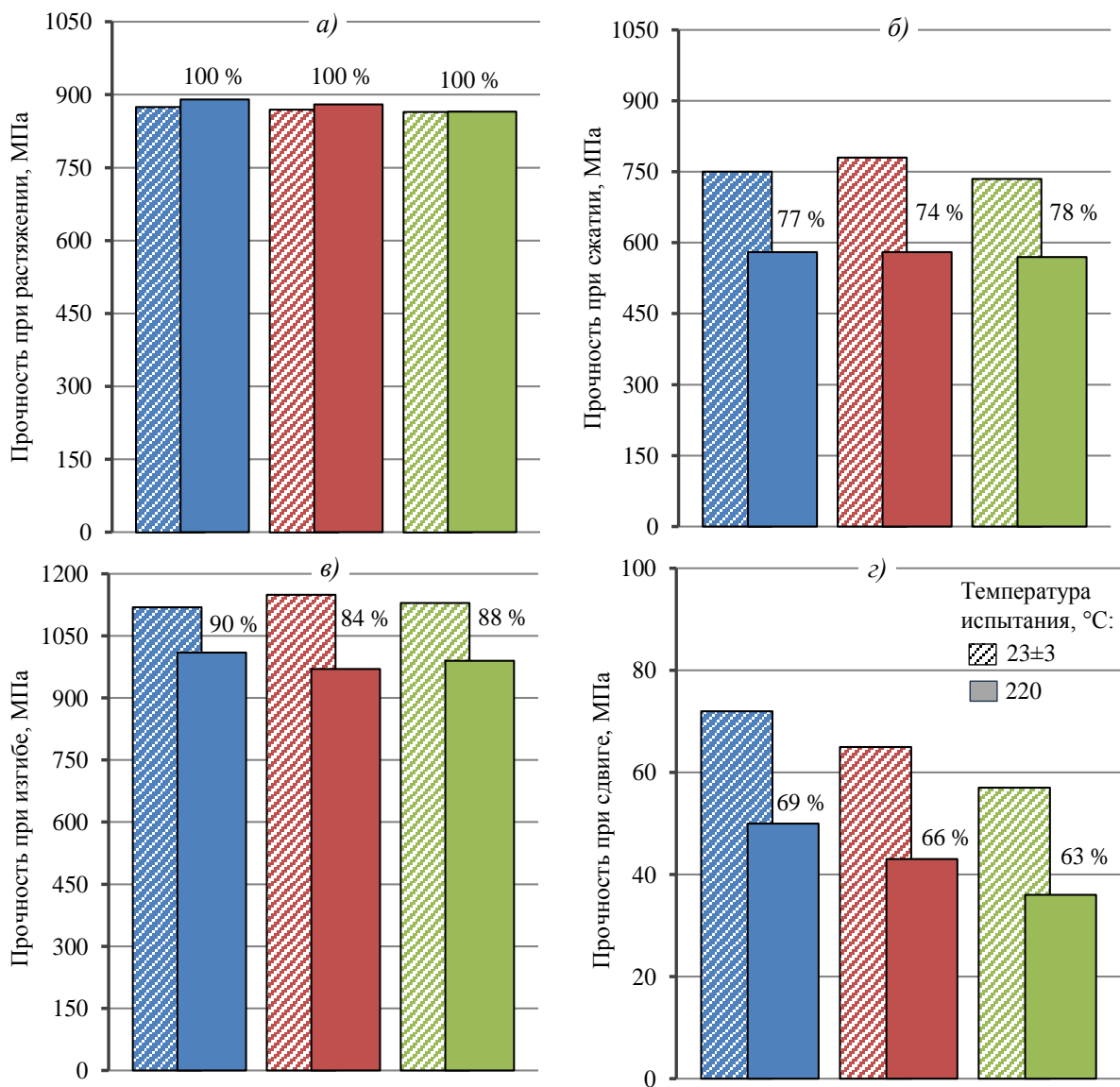


Рис. 6. Прочность и ее сохранение при растяжении (а), сжатии (б), изгибе (в) и межслойном сдвиге (з) для углепластика на основе бисмалеинимидного связующего, изготовленного автоклавным (■), прессовым (■) и вакуумным (■) методами формования

### Заключения

В данной работе проведены экспериментальные исследования по получению углепластика различными методами формования: автоклавным, прессовым и вакуумным. Полученные углепластики исследованы методами неразрушающего контроля, которые позволили определить объемную долю пор – менее 0,1 % (для образцов углепластика, полученного вакуумным формованием в красной зоне по *C*-скану). Исследованы также другие физические характеристики углепластика, полученного разными методами, которые имеют одинаковый уровень значений независимо от метода формования: содержание связующего 33–34 %, плотность 1,555–1,557 г/см<sup>3</sup>, температура стеклования 273–275 °С, водопоглощение 0,78–0,88 %. При исследовании упруго-прочностных характеристик установлено, что образцы углепластика, полученного различными методами, находятся на одном уровне по прочности при растяжении, сжатии и изгибе. Уровень сохранения прочности при повышенной температуре испытаний 220 °С составил при испытаниях: на растяжение 100 %, на сжатие 84–90 %, на изгиб 74–78 %, при межслойном сдвиге 63–69 %.

В плитах углепластика, изготовленных вакуумным методом, несмотря на присутствие краевого эффекта и повышенную пористость до 2,8 % на расстоянии 1,5–2 см от края плиты, при испытании образцов из центральной зоны с минимальными значениями пористости получены характеристики на уровне характеристик для углепластиков, полученных автоклавным и прессовым методами формования. Существуют разные технологические приемы для устранения данного эффекта, и в дальнейшем будут продолжены работы для получения бездефектного углепластика вакуумным методом формования.

Проведенная работа показала, что углепластик на основе бисмалеинимидного связующего ВСТ-71, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, можно изготавливать разными методами формования. Автоклавный и прессовый методы позволяют обеспечить получение монолитной, бездефектной и минимально пористой структуры, а также получить высокий уровень свойств разработанного материала. Термостойкий углепластик ВСТ-71/ВТКУ-5 предназначен для эксплуатации при температурах до 220 °С.

### Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. ВИАМ 90 лет: гордимся прошлым, создаем будущее / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. 155 с.
3. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 23.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Kablov E.N. New generation materials and technologies for their digital processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
5. Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Сидорина А.И., Славин А.В. Высокотемпературные углепластики на основе полиимидных связующих // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
6. Гуняева А.Г., Курносков А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.

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. Hubert P., Fernlund G., Poursartip A. Autoclave processing for composites // *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. P. 414–434.
9. Бычкова Е.В., Борисова Н.В., Панова Л.Г. Технология переработки полимеров методами прессования и литья под давлением: учеб. пособие. Саратов; М.: Профобразование; Ай Пи Ар Медиа, 2021. 97 с.
10. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезактивных 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: 01.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
11. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 834–839.
12. Evsyukov S., Klomp-de Boer R., Stenzenberger H.D. et al. A new m-xylylene bismaleimide-based high performance resin for vacuum-assisted infusion and resin transfer molding // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. P. 3063–3072.
13. Бабкин А.В., Эрдни-Горяев Э.М., Солопченко А.В., Кепман А.В. Инфузионные бисмалеимидные связующие для полимерных композиционных материалов // *Химия и химическая технология*. 2015. № 58. С. 54–57.
14. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Кудрявцева А.Н. Применение бисмалеимидного связующего марки ВСТ-57 для получения теплостойких размеростабильных оснасток из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
15. BMI resin formulation for carbon fiber reinforced composite material, method for making it and BMI prepreg: pat. WO 2022120049; appl. 02.12.21; publ. 09.06.22.
16. Fischer G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics. Materials. Université de Lyon, 2015 // HAL archives-ouvertes: офиц. сайт. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (дата обращения: 18.07.2025).
17. 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.
18. Wu T., Jiang P., Zhang X. et al. Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing // *Materials and Design*. 2019. Vol. 180. P. 107947.
19. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Савицкий Р.С. Подход к выбору технологического режима изготовления ПКМ // *Труды ВИАМ*. 2021. № 11 (105). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
20. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 20–33.
21. Карташова Е.Д., Муйземнек А.Ю. Технологические дефекты в полимерных слоистых композиционных материалах // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер.: Технические науки*. 2017. № 2 (42). С. 79–89.
22. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
23. 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.

24. 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: мат. X Всерос. конф. «ТестМат». М.: ВИАМ, 2018. С. 65–79.
25. Косарина Е.И., Демидов А.А., Михайлова Н.А., Смирнов А.В. Теоретические аспекты при создании электронных эталонных рентгеновских снимков, содержащих количественную информацию // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
26. Демидов А.А., Крупнина О.А., Михайлова Н.А., Косарина Е.И. Исследование образцов из полимерных композиционных материалов методом рентгеновской компьютерной томографии и обработка томограмм с изображением объемной доли пористости // Труды ВИАМ. 2021. № 5 (99). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
27. Ветошкин С.В., Долгодворов А.В., Сыромятникова А.И. Исследование объемной микроструктуры конструкционного углерод-углеродного композиционного материала и создание компьютерной 3D-модели исследуемого образца // Вестник ПНИПУ. Сер.: Аэрокосмическая техника. 2014. № 2 (37). С. 202–221.
28. Mason K.F. Autoclave quality out-side the autoclave // High-performance composites. 2006. Vol. 14. P. 44–49.
29. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 831–838.
30. Amouroux S.C., Heider D., Gillespie Jr. J.W. Membrane-based VARTM: membrane and resin interactions // JEC Magazine. 2006. No. 24. P. 61–78.
31. Li W., Krehl J., Gillespie J.W., Heider D. Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process // Journal of Composite Materials. 2004. Vol. 38. No. 20. P. 1803.
32. 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). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru>. (дата обращения: 20.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
33. Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328 с.

#### References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. *VIAM is 90 years old: proud of the past, creating the future*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2022. 155 p.
3. Sidorov D.V., Grunin A.A., Schavnev A.A. Formation of carbon coatings in the process of methane pyrolysis by the chemical vapor deposition. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
4. Kablov E.N. New generation materials and technologies for their digital processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
5. Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Sidorina A.I., Slavin A.V. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on polyimide binders. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
6. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 25, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.

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. Hubert P., Fernlund G., Poursartip A. Autoclave processing for composites. *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 414–434.
9. Bychkova E.V., Borisova N.V., Panova L.G. *Technology of polymer processing by pressing and injection molding methods*: textbook. Saratov; Moscow: Profobrazovanie; IPR Media, 2021, 97 p.
10. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: July 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
11. Postnov V.I., Veshkin E.A., Abramov P.A. Ways to improve the quality of parts made of polymer composite materials during vacuum forming. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (3), pp. 834–839.
12. Evsyukov S., Klomp-de Boer R., Stenzenberger H.D. et al. A new m-xylylene bismaleimide-based high performance resin for vacuum-assisted infusion and resin transfer molding. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 53, pp. 3063–3072.
13. Babkin A.V., Erdni-Goryaev E.M., Solopchenko A.V., Kepman A.V. Infusion bismaleimide binders for polymer composite materials. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2015, no. 58, pp. 54–57.
14. Tkachuk A.I., Terekhov I.V., Gurevich Ya.M., Kudryavtseva A.N. Application of bismaleimide VST-57 binder for obtaining heat-resistant dimensionally stable molds from polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 32–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-32-40.
15. *BMI resin formulation for carbon fiber reinforced composite material, method for making it and BMI prepreg*: pat. WO 2022120049; appl. 02.12.21; publ. 09.06.22.
16. Fischer G. High temperature and toughened bismaleimide composite materials for aeronautics. Materials. Université de Lyon, 2015. *HAL archives-ouvertes*. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01299359> (accessed: July 18, 2025).
17. 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.
18. Wu T., Jiang P., Zhang X. et al. Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing. *Materials and Design*, 2019, vol. 180, p. 107947.
19. Veshkin E.A., Satdinov R.A., Savitsky R.S. Approach to the selection of technological mode for the manufacture of PCM. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-103-111.
20. Troitsky V.A., Karmanov M.N., Troitskaya N.V. Non-destructive testing of composite materials quality. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2014, no. 3, pp. 20–33.
21. Kartashova E.D., Muizemnek A.Yu. Technological defects in polymer layered composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Ser.: Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.
22. Mikhaylin Yu.A. *Heat, thermal and fire resistance of polymeric materials*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2011, 416 p.
23. Boychuk A.S., Dikov I.A., Chertischev V.Yu., Generalov A.S. Determination of porosity in monolithic parts and aircraft wing assemblies made of polymer composite materials using the ultrasonic echo-pulse method. *Defektoskopiya*, 2019, no. 1, pp. 3–9.
24. Dikov I.A., Boychuk A.S., Chertishchev V.Yu., Generalov A.S. Features of determining porosity in polymer composite parts using the ultrasonic echo-pulse testing method. *Main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry: Proc. of the X All-Rus. Conf. «TestMat»*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 65–79.

25. Kosarina E.I., Demidov A.A., Mikhaylova N.A., Smirnov A.V. Theoretical aspects when creating electronic reference X-ray images containing quantitative information. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 87–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-87-94.
26. Demidov A.A., Krupnina O.A., Mikhaylova N.A., Kosarina E.I. Investigation of polymer composite material samples by x-ray computed tomography and processing of tomograms with the image of the volume fraction of porosity. *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-105-113.
27. Vetoshkin S.V., Dolgodvorov A.V., Syromyatnikova A.I. Study of the volume microstructure of structural carbon-carbon composite material and creation of a computer 3D model of the studied sample. *Bestnik PNIPU. Ser.: Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2014, no. 2 (37), pp. 202–221.
28. Mason K.F. Autoclave quality out-side the autoclave. *High-performance composites*, 2006, vol. 14. P. 44–49.
29. Veshkin E.A., Postnov V.I., Abramov P.A. Ways to improve the quality of parts made of polymer composite materials during vacuum forming. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (3), pp. 831–838.
30. Amouroux S.C., Heider D., Gillespie Jr. J.W. Membrane-based VARTM: membrane and resin interactions. *JEC Magazine*, 2006, no. 24, pp. 61–78.
31. Li W., Krehl J., Gillespie J.W., Heider D. Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process. *Journal of Composite Materials*, 2004, vol. 38, no. 20, pp. 1803.
32. 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), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
33. Bessonov M.I., Koton M.M., Kudryavtsev V.V., Laius L.A. *Polyimides – a class of heat-resistant polymers*. Leningrad: Nauka, 1983б 328 p.

#### Информация об авторах

**Начаркина Анастасия Витальевна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Зеленина Ирина Викторовна**, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Смирнов Алексей Владимирович**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Бойчук Александр Сергеевич**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Anastasia V. Nacharkina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Irina V. Zelenina**, Leading Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksey V. Smirnov**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksander S. Boychuk**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 02.09.2025.

The article was submitted 21.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 02.09.2025.