

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87

РАЗРАБОТКА УГЛЕ- И СТЕКЛОПРЕПРЕГОВ, ПЕРЕРАБАТЫВАЕМЫХ ВАКУУМНЫМ ФОРМОВАНИЕМ, С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ ИНВАЛИДОВ

К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваев¹, А.Д. Грачева¹, Ф.А. Сабуров¹, А.И. Ткачук¹,
Е.В. Седов², М.Ф.М. Шеббо²

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

²Общество с ограниченной ответственностью «Анатомикс Бионическая Лаборатория», Москва, Россия; filipp.shebbo@antmx.ru

Аннотация. Полимерные композиционные материалы все более активно используются при изготовлении средств реабилитации инвалидов, в частности протезов и ортезов, в том числе с применением препрегов, перерабатываемых методом вакуумного формования. Потребность в материалах в этой отрасли увеличивается. В основном с этой целью используются материалы зарубежного производства, и импортозамещение становится все более актуальным. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана серия материалов, которые можно использовать для изготовления средств реабилитации инвалидов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, препреги, вакуумное формование, связующее, технологический пакет, оснастка, вакуумирование, пропитка, средства реабилитации инвалидов

Для цитирования: Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Грачева А.Д., Сабуров Ф.А., Ткачук А.И., Седов Е.В., Шеббо М.Ф.М. Разработка угле- и стеклопрепегов, перерабатываемых вакуумным формованием, с пониженной температурой отверждения для изготовления средств реабилитации инвалидов // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87.

Scientific article

DEVELOPMENT OF CARBON AND GLASS PREPREG PROCESSED BY VACUUM MOLDING WITH LOW CURING TEMPERATURE FOR THE MANUFACTURE OF REHABILITATION EQUIPMENT FOR THE DISABLED

K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹, A.D. Gracheva¹, F.A. Saburov¹, A.I. Tkachuk¹,
E.V. Sedov², M.F.M. Shebbo²

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

²Limited Liability Company «ANATOMIKS», Moscow, Russia; filipp.shebbo@antmx.ru

Abstract. Polymer composite materials are increasingly being used in the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled, particularly in the production of prostheses and orthoses, including the use of prepregs processed by vacuum molding. The demand for materials in this industry is growing steadily, with imported materials primarily used, and import substitution is becoming increasingly important. NRC «Kurchatov Institute» – VIAM has developed a series of materials that can be used in this industry.

Keywords: polymer composite materials, prepregs, vacuum forming, binder, technological package, tooling, vacuuming, impregnation, rehabilitation equipment for the disabled

For citation: Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Gracheva A.D., Saburov F.A., Tkachuk A.I., Sedov E.V., Shebbo M.F.M. Development of carbon and glass prepreg processed by vacuum molding with low curing temperature for the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-74-87.

Введение

В настоящее время автоклавный способ изготовления конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является преобладающим в промышленности ввиду высокого и стабильного качества получаемых изделий [1–4]. Однако существуют определенные ограничения его использования, связанные в первую очередь с высоким энергопотреблением и стоимостью производственного оборудования. Кроме того, строгий государственный контроль безопасности технологических процессов ограничивает широкое распространение автоклавного способа и обеспечивает его доступность лишь крупным производителям изделий из ПКМ [5].

Ввиду увеличивающейся потребности в таких материалах на рынке появляются производители, для которых использование автоклавных процессов является затруднительным. Необходимо внедрение технологических процессов изготовления ПКМ со свойствами, приближенными к характеристикам аналогичных «автоклавных» материалов [6–8]. Одним из таких процессов является вакуумное формование препрегов и семипрегов, позволяющее получать высококачественные пластики с высокими физико-механическими показателями. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны такие материалы – препреги и семипреги на основе эпоксидной матрицы, тканых и однонаправленных наполнителей [9–11], перерабатываемые при температурах до 180 °С. Однако не всем потребителям ПКМ необходимы материалы с такой температурой переработки и, соответственно, повышенной рабочей температурой.

В рамках выполнения исследований проведен ряд работ, включающих разработку как расплавленного эпоксидного связующего, так и угле- и стеклопрепрегов на его основе для переработки методом вакуумного формования при пониженной температуре отверждения (125 °С). Соответственно, исследованы физико-механические свойства полученных материалов для определения основных параметров их использования, в частности при изготовлении технических средств реабилитации инвалидов.

На отечественном рынке в основном представлены импортные материалы, готовые изделия, в частности протезно-ортопедические, зачастую также зарубежного производства. С учетом увеличивающейся потребности в ПКМ и необходимости замещения продукции иностранных производителей опробование разработанных материалов проводили при изготовлении конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы. Такие материалы должны отвечать стандартам изготовления и эксплуатации технических средств реабилитации, иметь четкие и понятные характеристики для инженерных расчетов и составления технологических карт в процессе разработки и планирования производства.

В настоящее время приобретение новых и поддержание в работоспособном состоянии уже установленных технических средств реабилитации зарубежных компаний осложнены или невозможны, что делает особенно актуальным вопрос о локализации производства изделий такого рода. Актуальность исследования конструкций из угле- и стеклопластиков, полученных методом вакуумного формования препрегов, для протезно-ортопедической области обусловлена несколькими факторами [12–14]:

– уникальное сочетание свойств ПКМ (высокая прочность и жесткость при сравнительно малой массе, что критически важно для создания комплектующих узлов протезов и ортезов, которые должны быть одновременно прочными и комфортными для пользователя);

– вакуумное формование препрегов позволяет создавать сложные по форме изделия с высокой точностью, что особенно ценно при изготовлении индивидуальных конструкций протезов и обеспечивает уровень комфорта, учитывающий анатомические особенности пациента;

– использование угле- и стеклопластиков открывает возможности для создания узлов протезов с улучшенными функциональными характеристиками. Например, можно точнее моделировать биомеханику естественного движения суставов, увеличивать устойчивость к нагрузкам и износу, а также интегрировать в конструкцию электроды и другие компоненты для создания микропроцессорных узлов для протезов.

Материалы и методы

В процессе разработки угле- и стеклопрепрегов, перерабатываемых методом вакуумного формования, с пониженной температурой отверждения для изготовления средств реабилитации инвалидов выполнены технологические операции:

– по разработке и изготовлению связующего марки ВСЭ-80 (выбор исходных компонентов, подбор режимов изготовления и оптимизация состава, исследование свойств и выпуск нормативной документации);

– по изготовлению угле- и стеклопрепрегов марок ВКУ-75 и ВПС-77 соответственно на основе разработанного связующего (оптимизация и подбор режимов изготовления, исследование свойств и выпуск нормативной документации);

– по изготовлению образцов угле- и стеклопластиков на основе полученных препрегов (определение оптимальной схемы сборки технологических пакетов для двух типов материалов, выбор режима отверждения и исследование физико-механических свойств ПКМ);

– по изготовлению конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы (выбор оптимальной формы, оценка расчетной модели изделия в нагруженном состоянии, определение геометрических параметров элементов, отработка технологии изготовления изделий и их исследование методами ультразвукового контроля и рентгеновской компьютерной томографии с целью оценки качества полученных образцов).

Результаты и обсуждение

Разработка и изготовление связующего

Применяемые в промышленности термореактивные полимерные связующие, перерабатываемые с использованием автоклавной и безавтоклавной (вакуумной) технологий, должны обладать следующими свойствами:

– длительный период хранения;

– непродолжительное формообразование и сравнительно невысокая температура доотверждения для улучшения энергоэффективности процесса получения деталей из ПКМ;

– узкий интервал реологических характеристик связующего, подходящих для выбранного метода переработки [15, 16].

Физико-механические и термомеханические характеристики ПКМ напрямую зависят от типа и состава используемого наполнителя и связующего, поскольку в процессе формообразования и последующего доотверждения в результате физико-химических и химических процессов связующее превращается в трехмерную сшитую матрицу, обеспечивающую монолитность конструкционного материала в целом. Существенное влияние на прочностные характеристики ПКМ оказывают качество пропитки наполнителя связующим и адгезия наполнителя к матрице, а также выбранные методы формования и подготовки вакуумных пакетов [17].

Критически важными характеристиками ПКМ, напрямую зависящими от состава и свойств наполнителя и матрицы, являются физико-механические свойства, деформационная устойчивость, тепло-, термо-, влаго- и атмосферостойкость.

Важнейшими технологическими характеристиками связующего являются время гелеобразования, величина экзотермического эффекта в момент максимальной скорости процесса отверждения, исходные реологические характеристики и динамика их изменения в процессе переработки. Перечисленные характеристики определяют выбор оптимальной технологии переработки связующего в соответствии с конструктивными и геометрическими особенностями изготавливаемых деталей [18–20].

Среди терморезактивных связующих, удовлетворяющих большинству данных требований, наиболее часто используются эпоксидные связующие. Основным компонентом эпоксидных связующих является смесь реакционноспособных эпоксидных олигомеров с отвердителями [21–24]. Химическая природа, характер молекулярно-массового распределения, содержание и стерическая доступность реакционноспособных групп и, как следствие, надмолекулярная структура эпоксидного олигомера определяют технологические, термомеханические и прочностные свойства материала. Для отверждения эпоксидных смол используются отвердители различных типов (аминные, ангидридные, каталитические).

Разработано расплавное эпоксидное связующее марки ВСЭ-80, процесс изготовления которого включает получение форполимера и отверждающей пасты, синтез связующего, слив готового продукта из реактора, отбор проб и контроль качества. Связующее марки ВСЭ-80 обладает следующими свойствами:

Внешний вид	Вязкая масса желтовато-кремового цвета
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре переработки $80,0 \pm 1,0$ °С, Па·с (не более)	18,5
Время гелеобразования при температуре отверждения 125 ± 2 °С, мин (не более)	42
Температура стеклования отвержденного связующего, °С (не менее)	130

Изготовление угле- и стеклопрепегов на основе связующего марки ВСЭ-80

С использованием разработанного связующего на пропиточной установке для изготовления препрегов получены угле- и стеклопрепреги, стадии процесса представлены на рис. 1.

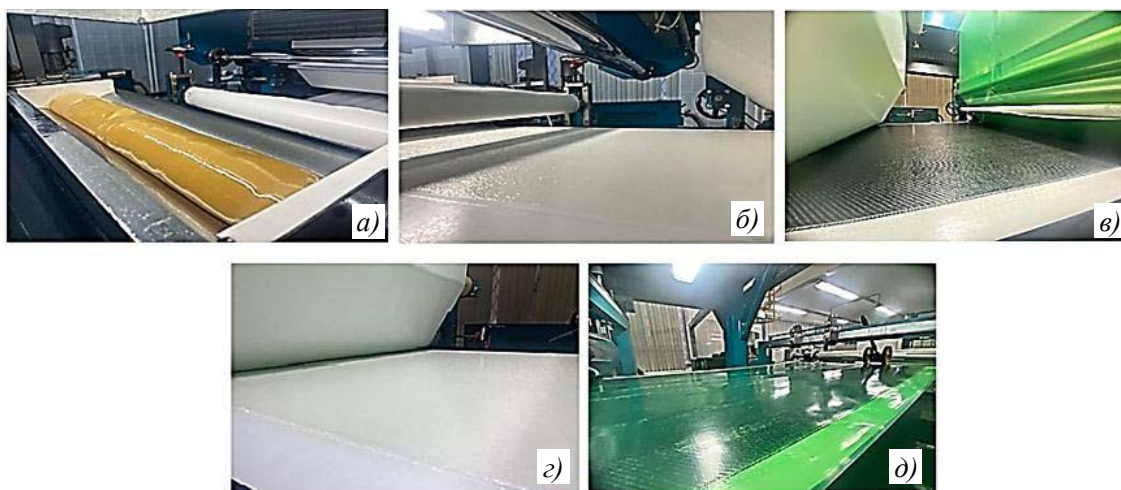


Рис. 1. Основные стадии изготовления препрегов на пропиточной установке: *a* – разогрев партии расплавного эпоксидного связующего на валах пропиточной установки; *б* – изготовленная пленка расплавного эпоксидного связующего; *в*, *г* – совмещение угле- и стеклонаполнителей с полученной пленкой связующего; *д* – совмещение изготовленного препрега с защитной полиэтиленовой пленкой

Исследованы свойства полученных образцов угле- и стеклопрепрегов (табл. 1).

Таблица 1

**Свойства образцов угле- и стеклопрепрегов, полученных на основе
расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-80**

Характеристика	Нормативная документация	Значения характеристик для образца	
		углепрепрега	стеклопрепрега
Жизнеспособность, сут	ГОСТ Р 56755–2015	30	30
Содержание связующего, % (по массе)	ГОСТ Р 56796–2015	38,2–39,4	37,7–38,4
Ширина препрега, мм	ГОСТ 29104.1–91	995–996	927
Поверхностная плотность (среднее значение), г/м ²	ГОСТ 32649–2014	326	473,9

Для изготовителя продукции важным параметром является жизнеспособность препрега. Это соотношение значений теплового эффекта, определенных методом дифференциальной сканирующей калориметрии, для образцов препрега угле- и стеклопластиков в исходном состоянии и после хранения при температуре 23 ± 2 °С в течение 30 сут. Установлено, что в образцах препрега угле- и стеклопластика соотношение значений теплового эффекта изменяется незначительно (<15 %). Химическая реакция в данных условиях не происходит, следовательно, они пригодны для переработки в ПКМ после хранения при температуре 23 ± 2 °С в течение 30 сут.

Изготовление образцов угле- и стеклопластиков

С использованием полученных образцов угле- и стеклопрепрегов изготовлены образцы угле- и стеклопластиков, исследованы их физико-механические свойства (табл. 2).

Таблица 2

Свойства полученных образцов угле- и стеклопластиков

Характеристика	Значения характеристик для образца	
	углепластика ВКУ-75	стеклопластика ВПС-77
Объемная доля пор, %	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$
Плотность, г/см ³	1,51	1,83
Температура стеклования $T_{g \text{ drv}}$, °С	135	134
Степень отверждения, %	99	98
Предел прочности при растяжении при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, МПа	1031	620
Модуль упругости при растяжении при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, ГПа	59	26
Предел прочности при изгибе при температуре 23 ± 3 °С, МПа	965	817
Предел прочности при сдвиге при температуре 23 ± 3 °С, МПа	71	70
Предел прочности при сжатии при температуре 23 ± 3 °С в направлении 0 градусов, МПа	625	519

На рис. 2 представлены С-сканы плит стекло- и углепластиков.

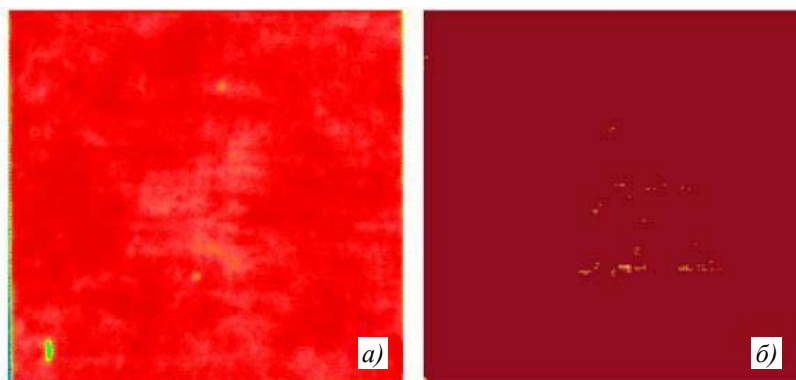


Рис. 2. С-сканы плит стекло- (а) и углепластиков (б)

Установлено, что в плитах угле- и стеклопластиков не выявлены области повышенного затухания с уменьшением амплитуды донного эхосигнала, превышающим уровень фиксации (более чем в 2 раза), что подтверждается однородной цветовой гаммой. Полученные плиты угле- и стеклопластиков по структуре однородны.

Результаты испытаний показали достаточность заявленной температуры отверждения материалов (125 °С), что подтверждается высокими значениями степени отверждения, характерными для полностью отвержденных пластиков. Полученные значения механических свойств также соответствуют показателям материалов, выполненных на основе тканых угле- и стеклонеполнителей.

Изготовление конструктивно-подобных образцов фрагмента модуля стопы

Совместно с ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория» изготовлены конструктивно-подобные образцы панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы с учетом ожидаемых требований к эксплуатации технических средств реабилитации.

Современные фрагменты модуля стопы [25–28] представляют собой изогнутую плоскую пружину, изготовленную из угле- или стеклопластиков, имитирующую естественную механику бега (рис. 3).



Рис. 3. Примеры фрагментов модуля стопы S- (а), С- (б) и J-образных (в) форм, изготовленных из полимерных композиционных материалов зарубежными производителями

В настоящее время используют три основные геометрические формы модуля стопы (S-, С- и J-образные), каждая из которых имеет достоинства и недостатки (табл. 3)

[29–31]. S-образная форма модуля стопы представляет собой профиль с переменным изгибом; C-образная – производится чаще и пользуется спросом у большого количества пользователей; J-образная – обладает преимуществами обеих форм модуля стопы.

Таблица 3

Форма модуля стопы	Преимущества	Недостатки
S-образная	Лучше поглощает разнонаправленные нагрузки, возникающие при отталкивании во время бега, за счет нескольких последовательных зон деформации. Имеет более плавный перекаат, имитирующий естественную биомеханику стопы. За счет большей жесткости обеспечивает хорошую устойчивость к боковым и скручивающим нагрузкам	Имеет низкий коэффициент полезного действия, взаимная компенсация изгибов снижает возврат энергии при отталкивании. Точки перегиба являются концентраторами напряжений и снижают сопротивление усталости изделия. Наличие концентраторов напряжений в точках перегибов вынуждает усиливать эти зоны, что ведет к увеличению общей массы изделия. Сложная форма изделия может привести к трудностям при формовке углепластика ввиду необходимости дополнительного контроля в зонах перегиба
C-образная	Благодаря простой форме с одним работающим радиусом осуществляется эффективная передача энергии. Единственный перегиб позволяет управлять жесткостью и получать предсказуемое поведение изделия при прямолинейном движении во время бега. Имеет меньшую массу по сравнению с S-образной формой за счет плавного уменьшения толщины и меньшего количества концентраторов напряжений	Высокая жесткость изделия ограничивает возможности его применения при беге. По этой же причине такая стопа имеет более жесткое приземление и отталкивание, что создает дополнительную ударную нагрузку на суставы. Стопа имеет фиксированную «строительную высоту». Это означает, что ее могут использовать только люди с определенной длиной ампутированной конечности
J-образная	Обеспечивает максимальный возврат энергии при отталкивании, коэффициент полезного действия достигает 90 %. За счет длинного плеча происходит очень плавное нагружение протеза при ударе о поверхность, при этом амортизация лучше, чем у любой другой формы. Универсальна для разных дистанций и видов бега, так как позволяет управлять жесткостью при расчете изделия. Открытая форма с одним рабочим радиусом способствует равномерному распределению напряжений по всему объему композита, что увеличивает ресурс изделия. Выкладка композита на открытой форме проще, чем для S-образной формы, и не сложнее, чем для C-образной, что позволяет минимизировать ошибки при производстве. Расположение крепления на вертикальной части протеза позволяет подстроить «строительную высоту» протеза под конкретного пользователя и подходит для большего диапазона длины ампутированной конечности	–

Таким образом, J-образная форма выбрана базовой как отвечающая всем требованиям потребителей данных средств реабилитации и имеющая хорошую референсную базу, которая позволит в перспективе проанализировать готовое изделие и сравнить с аналогами, уже распространенными и применяющимися для реабилитации инвалидов в разных странах.

Проведена оценка расчетной модели изделия в нагруженном состоянии (рис. 4).

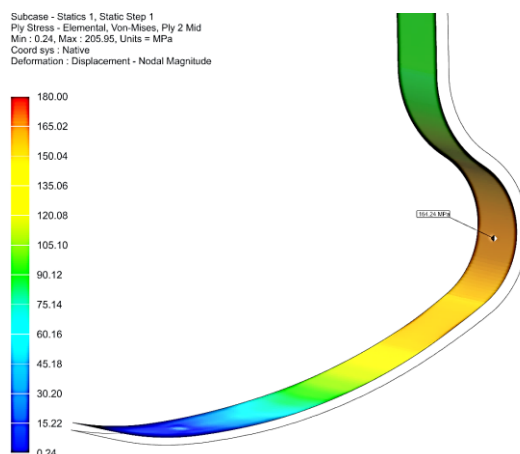


Рис. 4. Расчетная модель модуля стопы J-образной формы в нагруженном состоянии

Цвет модели отражает напряжения, которые возникают в изделии при испытании. Видно, что основную работу выполняет дуга, расположенная под местом крепления протеза, далее напряжения стремятся к нулю в носочной части.

С учетом существующих широко распространенных и уже реализованных на рынке образцов модуля стопы определены геометрические параметры элементов изделия (рис. 5).

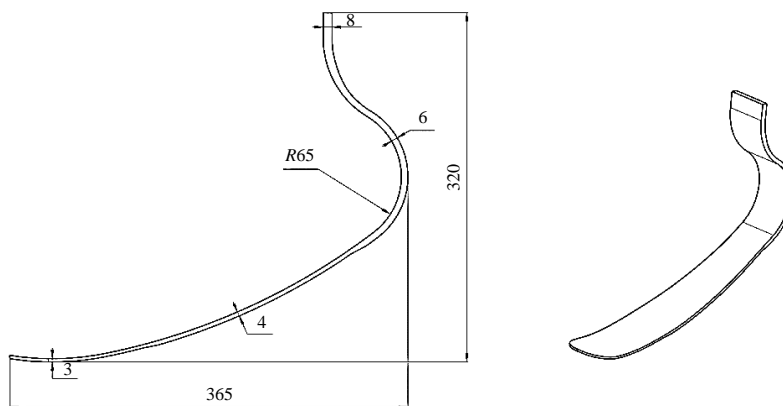


Рис. 5. Выбранные геометрические параметры для элементов изделия

В таком исполнении стопа будет иметь достаточную жесткость в месте крепления и позволит должным образом отрабатывать силу реакции опоры при отталкивании, обеспечивая стабильный толчок. Длинное плечо позволит эффективно отталкиваться, сохраняя значительное количество энергии от загрузки пружинящей части [32].

Для получения экспериментальных конструктивно-подобных образцов фрагмента модуля стопы отработана технология изготовления образцов сложной геометрической формы.

Основной технологической задачей являлось предотвращение образования дефектов в виде складок и наслоения материала, возникающих из-за значительной толщины пакета и сложности рельефа оснастки. Показано, что для пакета большой толщины многоступенчатая укладка с сокращенным количеством слоев на каждом этапе является необходимым условием для обеспечения высокого качества поверхности и формы детали.

Кроме того, показано, что важным фактором получения качественных образцов является выбор материала цулаг. В частности, использование цулаг из чрезмерно жестких материалов большой толщины приводило к искажению формы детали и появлению напряжений во внутренних углах. Цулаги из чрезмерно мягких материалов (например, лакоткань, тонкий текстолит) формировали излишне подробную ответную часть, повторяя все локальные впадины материала и неровности, что также негативно сказывалось на распределении давления.

Оптимальным решением является использование тонких металлических цулаг, которые обеспечивают баланс между жесткостью, необходимой для поддержания общей формы, и гибкостью, достаточной для эффективного «сдавливания» препрега в технологическом пакете.

В результате проведенных мероприятий разработан и успешно апробирован технологический процесс, позволяющий изготавливать детали сложной формы без дефектов. Ключевыми факторами успеха стали многоступенчатая сборка пакета, корректный подбор материала и конфигурации вспомогательных слоев, а также адаптация режима отверждения под специфические условия процесса.

На рис. 6 приведены стадии подготовки сборки вакуумного технологического пакета.



Рис. 6. Стадии подготовки сборки вакуумного технологического пакета: *а* – выложенный препрег на формообразующей оснастке с «лицевой» цулагой; *б* – сборка с жертвенной тканью; *в* – сборка после отверждения связующего; *г* – экспериментальные конструктивно-подобные образцы панелей корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы из угле- и стеклопластиков

Для подтверждения качества обработки процесса изготовления фрагмента модуля стопы из угле- и стеклопластиков проведены исследования методами ультразвукового контроля и рентгеновской компьютерной томографии. Ультразвуковой контроль эхоимпульсным методом в ручном режиме подтвердил отсутствие дефектов и расслоений во фрагменте модуля стопы (рис. 7).

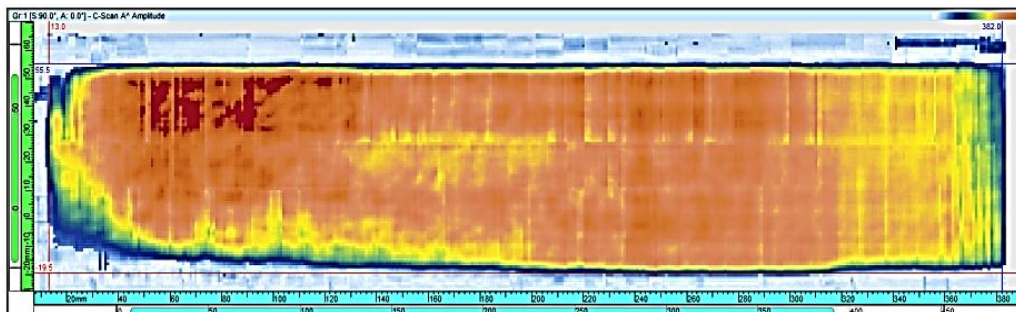


Рис. 7. C-скан образца фрагмента модуля стопы

Проведенные исследования образцов как угле-, так и стеклопластиков методом рентгеновской компьютерной томографии также показали отсутствие внутренних дефектов и наличие пористости, не превышающей 1,5 % (рис. 8).

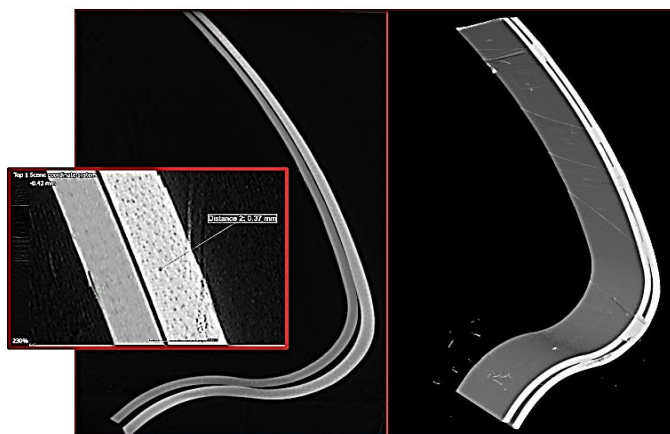


Рис. 8. Типичные изображения образца фрагмента модуля стопы в разных плоскостях, полученные методом рентгеновской компьютерной томографии

Для подтверждения правильности выбранного режима отверждения препрегов при изготовлении угле- и стеклопластиков определена степень отверждения материалов, которая составила 98,0 и 97,5 % соответственно.

Заключения

Разработаны связующее, угле- и стеклопрепреги, перерабатываемые методом вакуумного формования, с пониженной температурой отверждения, а также материалы на их основе для широкого использования в отраслях промышленности, где есть потребность производства изделий из ПКМ энергоэффективными методами с использованием дешевых процессов переработки, в том числе при изготовлении средств реабилитации инвалидов. С учетом увеличения потребности в материалах в этой отрасли и превалирования в настоящее время материалов зарубежного производства их импортозамещение становится все более актуальным.

Разработанные материалы с пониженной температурой отверждения опробованы при изготовлении конструктивно-подобных образцов панели корпусной конструкции сложной формы – фрагмента модуля стопы. Постоянно увеличивающийся спрос на протезно-ортопедические изделия и направленность на улучшение качества жизни пациентов, появление новых технологий обработки композиционных материалов делают исследования в этой области чрезвычайно актуальными и необходимыми.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-012 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04.07.2023 об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».

Список источников

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
5. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 536 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением». URL: <http://www.infobm.ru/upload/Правила%20промышленной%20безопасности%20при%20использовании%20оборудования.pdf> (дата обращения: 10.10.2025).
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Бабаевский П.Г., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / под ред. Е.Б. Тростянской. М.: Химия, 1974. 304 с.
8. Berring N.S., Renieri M.P., Bond G.G., Palmer D.J. Autoclave vs. Non-Autoclave: A comparison of hat-stiffened subcomponents by static and fatigue testing and related non-destructive evaluations // 2012 SAMPE International Symposium and Exhibition-Emerging Opportunities: Materials and Process Solutions. Baltimore, MD, 2012. P. 23–25.
9. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Грачева А.Д., Ткачук А.И. Семипреги и углепластики на их основе // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
10. Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Сафронов А.М., Гончаров В.А., Мишун М.И. Безавтоклавное формование препрегов // Конструкции из композиционных материалов. 2022. № 1 (165). С. 29–34.
11. Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Некоторые технологические особенности изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

12. Якобсон Я.С., Кужекин А.П., Самойлов Д.В., Шишкин Б.В. Энергосберегающие протезы нижних конечностей // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 129.
13. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Рудаков Р.Н. Математическое моделирование и оптимизация конструкции упругого элемента протеза стопы // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 87–88.
14. Борисов И.М., Резник С.В. Разработка композитной конструкции биомеханического назначения // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 348–354. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354.
15. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
16. 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.
17. Михайлин Ю.А. Термореактивные связующие ПКМ // Полимерные материалы. 2009. № 2. С. 40–45.
18. Панина Н.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Гребенева Т.А., Гуревич Я.М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 9. С. 10–17.
19. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. СПб: Профессия, 2020. 550 с.
20. Мостовой А.С. Рецептурная модификация эпоксидных смол с использованием новых высокоэффективных пластификаторов // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 7. С. 66–70.
21. Чеботарева Е.Г., Огрель Л.Ю. Современные тенденции модификации эпоксидных полимеров // Фундаментальные исследования. 2008. № 4. С. 102–104.
22. Бобылев В.А. Специальные эпоксидные смолы для клеев и герметиков // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. Т. 5. С. 8–12.
23. Загора А.Г. Применение дициандиамида в составе эпоксидных клеев, связующих и ПКМ на их основе (обзор) // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 4. С. 35–37.
24. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. М.: Энергия, 1973. 108 с.
25. Галимзянова Р.Ю. Современные композиционные материалы в производстве медицинской техники: учеб. пособие. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. 89 с.
26. Romo H.D. Specialized prostheses for activities: an update // *Clinical Orthopaedic Related Research*. 1999. Vol. 361. P. 63–70.
27. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Перспективы использования полимерных композиционных материалов при изготовлении протезов (обзор) // Пластические массы. 2021. № 5-6. С. 40–43. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-40-43.
28. Scholz M.-S., Blanchfield J.P., Bloom L.D. et al. The use of composite materials in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: A review // *Composites Science and Technology*. 2011. Vol. 71. P. 1791–1803.
29. Nolan L. Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review // *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. 2008. Vol. 14 (3). P. 125–129.
30. McCarvill S. Essay: prosthetics for athletes // *The Lancet*. 2005. Vol. 366 (1). P. 10–11.
31. Berry D.A. Composite material for orthotics and prosthetics // *Orthotics and Prosthetics*. 1987. Vol. 40 (4). P. 35–43.
32. Tryggvason H., Starker F., Lecompte Ch., Jonsdottir F. Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot // *Proceedings of the 58th SIMS*. Reykjavik, 2017. P. 398–404.

References

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 122–144. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 5, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-349-367.
4. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
5. *Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of December 15, 2020 No. 536 «On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety «Industrial safety rules for the use of equipment operating under excess pressure»*. Available at: <http://www.infobm.ru/upload/Правила%20промышленной%20безопасности%20при%20использовании%20оборудования.pdf> (accessed: October 10, 2025).
6. Mikhaylin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2013, 720 p.
7. Babaevsky P.G., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Structural Plastics (Therapeutic Plastics)*. Ed. E.B. Trostyanskaya. Moscow: Khimiya, 1974, 304 p.
8. Berring N.S., Renieri M.P., Bond G.G., Palmer D.J. Autoclave vs. Non-Autoclave: A comparison of hat-stiffened subcomponents by static and fatigue testing and related non-destructive evaluations. *2012 SAMPE International Symposium and Exhibition-Emerging Opportunities: Materials and Process Solutions*. Baltimore, MD, 2012, pp. 23–25.
9. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D., Tkachuk A.I. Semipregs and carbon fiber reinforced plastics based on them. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 21, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
10. Donetskii K.I., Timoshkov P.N., Safronov A.M., Goncharov V.A., Mishchun M.I. Autoclave-free molding of prepregs. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2022, no. 1 (165), pp. 29–34.
11. Tkachuk A.I., Kyznecova P.A., Donetskii K.I., Karavaev R.Yu. Some technological features of manufacturing polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.
12. Yakobson Ya.S., Kuzhekin A.P., Samoilo D.V., Shishkin B.V. Energy-saving lower limb prostheses. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 1999, vol. 3, no. 2, p. 129.
13. Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Rudakov R.N. Mathematical modeling and optimization of the design of an elastic element of a foot prosthesis. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki*, 1999, vol. 3, no. 2, pp. 87–88.
14. Borisov I.M., Reznik S.V. Development of a composite structure for biomechanical purposes. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Ser.: Inzhenernyye issledovaniya*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 348–354. DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354.
15. Tkachuk A.I., Donetskii 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: October 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
16. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
17. Mikhailin Yu.A. Thermosetting Binders of Polymeric Composites. *Polimernye materialy*, 2009, no. 2, pp. 40–45.
18. Panina N.N., Chursova L.V., Babin A.N., Grebeneva T.A., Gurevich Ya.M. Main Methods of Modifying Epoxy Polymer Materials in Russia. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2014, no. 9, pp. 10–17.
19. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Kutergina I.Yu. *Epoxy Resins, Hardeners, Modifiers, and Binders Based on Them*. St. Petersburg: Profession, 2020, 550 p.
20. Mostovoy A.S. Formulation modification of epoxy resins using new highly effective plasticizers. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2015, no. 7, pp. 66–70.

21. Chebotareva E.G., Ogrel L.Yu. Modern trends in the modification of epoxy polymers. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2008, no. 4, pp. 102–104.
22. Bobylev V.A. Special epoxy resins for adhesives and sealants. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, vol. 5, pp. 8–12.
23. Zagora A.G. Use of dicyandiamide in epoxy adhesives, binders and polymer composite materials based on them (review). *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2020, no. 4, pp. 35–37.
24. Li H., Neville K. *Reference Guide to Epoxy Resins*. Moscow: Energia, 1973, 108 p.
25. Galimzyanova R.Yu. *Modern Composite Materials in the Production of Medical Equipment: A Textbook*. Kazan: Kazan National Research Tech. Univ., 2021, 89 p.
26. Romo H.D. Specialized prostheses for activities: an update. *Clinical Orthopaedic Related Research*, 1999, vol. 361, pp. 63–70.
27. Timoshkov P.N., Usacheva M.N., Khrulkov A.V., Grigorieva L.N. Prospects for the use of polymer composite materials in the manufacture of prostheses (review). *Plasticheskie massy*, 2021, no. 5-6, pp. 40–43. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-40-43.
28. Scholz M.-S., Blanchfield J.P., Bloom L.D. et al. The use of composite materials in modern orthopedic medicine and prosthetic devices: A review. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 1791–1803.
29. Nolan L. Carbon fibre prostheses and running in amputees: a review. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 2008, vol. 14 (3), pp. 125–129.
30. McCarvill S. Essay: prosthetics for athletes. *The Lancet*, 2005, vol. 366 (1), pp. 10–11.
31. Berry D.A. Composite material for orthotics and prosthetics. *Orthotics and Prosthetics*, 1987, vol. 40 (4), pp. 35–43.
32. Tryggvason H., Starker F., Lecompte Ch., Jonsdottir F. Modeling and simulation in the design process of a prosthetic foot. *Proceedings of the 58th SIMS*. Reykjavik, 2017, pp. 398–404.

Информация об авторах

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

Караваев Роман Юрьевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Грачева Алена Дмитриевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сабуров Федор Алексеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ткачук Анатолий Иванович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Седов Егор Владимирович, ведущий инженер, ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория», egor.sedov@antmx.ru

Шеббо Монзер Филипп Мохамед, генеральный директор, ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория», filipp.shebbo@antmx.ru

Information about the authors

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

Roman Yu. Karavaev, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alyona D. Gracheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Fedor A. Saburov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly I. Tkachuk, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Egor V. Sedov, Leading Engineer, LLC «Anatomics», egor.sedov@antmx.ru

Monzer Philip Mohamed Shebbo, General Director, LLC «Anatomics», filipp.shebbo@antmx.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.11.2025.
The article was submitted 19.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 20.11.2025.