

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-73-85

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ ПРЕПРЕГОВ И СЕМИПРЕГОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ ИНВАЛИДОВ

К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваев¹, А.Д. Грачева¹, И.В. Стретьячук², М.Ф.М. Шеббо³

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

²Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма Орто-Космос», Мытищи, Московская обл., Россия; info@orto-kosmos.ru

³Общество с ограниченной ответственностью «Анатомикс Бионическая Лаборатория», Москва, Россия; filipp.shebbo@antmx.ru

Аннотация. Методы переработки полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием в связи со все более широким их применением в самых разнообразных областях промышленности, в первую очередь гражданских, становятся востребованными и актуальными благодаря низкой стоимости и простоте аппаратного оснащения. Актуальной областью применения полимерных композиционных материалов является производство средств реабилитации инвалидов, в частности элементов модулей повседневных и беговых стоп, для изготовления которых в настоящее время используются материалы импортного производства.

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

Для цитирования: Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Грачева А.Д., Стретьячук И.В., Шеббо М.Ф.М. Оценка возможности применения технологии вакуумного формования препрегов и семипрегов для изготовления средств реабилитации инвалидов // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-73-85.

Scientific article

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF USING VACUUM FORMING TECHNOLOGY OF PREPREGS AND SEMIPREGS FOR THE PRODUCTION OF REHABILITATION EQUIPMENT FOR THE DISABLED

K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹, A.D. Gracheva¹, I.V. Stretyachuk², M.F.M. Shebbo³

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 «Scientific and Production Firm Ortho-Cosmos», Mytishchi, Moscow region, Russia; info@orto-kosmos.ru

³Limited Liability Company «ANATOMIKS», Moscow, Russia; filipp.shebbo@antmx.ru

Abstract. Due to their increasing use in a wide variety of industries, primarily civil ones, polymer composite materials processed using non-autoclave molding are becoming increasingly popular due to their low cost and simple equipment. A current application of polymer composite materials is the manufacture of rehabilitation equipment for the disabled and, in particular, components of everyday and running foot modules, which are currently manufactured using imported materials.

Keywords: prepreg, semipreg, vacuum forming, binder, process package, vacuum treatment, impregnation, polymer composite materials, rehabilitation equipment for the disabled

For citation: Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Gracheva A.D., Stretyachuk I.V., Shebbo M.F.M. Evaluation of the possibility of using vacuum forming technology of prepregs and semipregs for the production of rehabilitation equipment for the disabled. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-73-85.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), выполненные с использованием препреговых технологий, широко используются в таких традиционных областях, как аэрокосмическая, машиностроительная, специальная и автомобильная промышленность [1–3]. Вместе с этим увеличение потребности в новых экономичных и экономически целесообразных изделиях как в авиационной, так и в иных высокотехнологичных отраслях промышленности вызывает необходимость постоянного обновления как самих материалов для этих изделий, так и технологий их изготовления [4, 5].

Благодаря отличным весовым и физико-механическим характеристикам ПКМ, изготовленные с использованием препреговых технологий, можно использовать для замены металлических сплавов [6, 7]. Однако все более актуальный запрос потребителей на высокую энергоэффективность технологических процессов и снижение стоимости требует поиска новых технологий переработки материалов. Особенно это заметно в гражданских областях промышленности, где важна экономическая эффективность изготовления продукции, что является одним из основных стимулирующих факторов их развития.

Таким способом стал вакуумный процесс формования с использованием препрегов или семипрегов (предварительно полностью или частично пропитанных связующим полуфабрикатов на основе тканых наполнителей или однонаправленных жгутов).

Замена энергоемкой технологии автоклавного формования на дешевую и простую технологию с низкими капиталовложениями позволила изготавливать конструкции практически без ограничений размеров получаемых изделий, которые налагает использование автоклава, и существенно сэкономить как на дорогостоящем оборудовании, так и на стоимости проведения самого процесса производства изделий. Как показано в работах [8–10], переход на новый способ изготовления не приводит к снижению уровня свойств изделий относительно традиционного автоклавного метода и практически гарантирует получение высокопрочных материалов. Зарубежные разработчики и производители материалов поставляют заказчикам как препреги для безавтоклавного формования, так и семипреги [11, 12].

Основными разработчиками технологий и производителями на мировом рынке препрегов являются компании Mitsubishi Rayon Co. Ltd, Teijin Limited, Toray Industries Inc., Hexcel Corporation, Gurit Holding AG, Royal Tencate N.V., SGL Group и др. В России производством препрегов с использованием различных типов наполнителей занимаются НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «Препрег-СКМ» и ООО «Итекма».

Кроме основных зарекомендовавших себя потребителей ПКМ (авиационная промышленность, машино- и судостроение, изготовление специальной техники и др.), такие материалы все чаще применяют производители средств реабилитации инвалидов (протезов и ортезов) по тем же основным причинам – уникальное сочетание прочностных и отличных весовых характеристик.

На рынке РФ в настоящее время широко представлены изделия импортных разработчиков и производителей, таких как компании Ottobock (Германия), Össur (Исландия), Orliman (Испания) (рис. 1) и др., а для изготовления отечественных средств реабилитации инвалидов чаще всего используют материалы импортного производства (европейские и китайские).



Рис. 1. Модули стоп зарубежного производства, используемые в России

Методы изготовления таких изделий разнообразны и включают как автоклавное, так и неавтоклавное формование с применением предлагаемых на рынке ПКМ и самостоятельным изготовлением слоистых материалов из углеродной ткани и различных смол.

Вследствие введения антироссийских санкций некоторые зарубежные производители модулей или прекратили поставки, или значительно увеличили их сроки. В связи с этим актуальной стала разработка отечественных модулей. Наряду со все еще доступными на отечественном рынке импортными модулями стали появляться отечественные разработки модулей стопы с различными функциональными характеристиками, предназначенные для пациентов различного уровня двигательной активности, в том числе модули стоп для занятий спортом. Новые конструкции модулей продолжает создавать один из основных отечественных разработчиков и производителей – ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория» (рис. 2).



Рис. 2. Образцы модулей стоп, разработанных и произведенных ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория»

В части изготовления индивидуальных изделий из ПКМ также появляются новые разработки. Например, НПФ «Орто-Космос» начала изготовление индивидуальных ортезов на голень (рис. 3). Но, к сожалению, расширение области их применения тормозится высокой стоимостью изделия, которая определяется в том числе высокой стоимостью используемых в производстве материалов, в частности препрегов.



Рис. 3. Образцы индивидуальных ортезов на голень и колено, разработанных и произведенных НПФ «Орто-Космос»

Материалы и методы

Как отмечено ранее, в качестве материалов для оценки применимости процесса вакуумного формования для изготовления средств реабилитации инвалидов выбраны разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ препрег ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и семипрег марки ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200. Геометрические параметры экспериментальной конструкции и несколько вариантов опытной алюминиевой оснастки для ее изготовления предоставило ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория» (рис. 4).

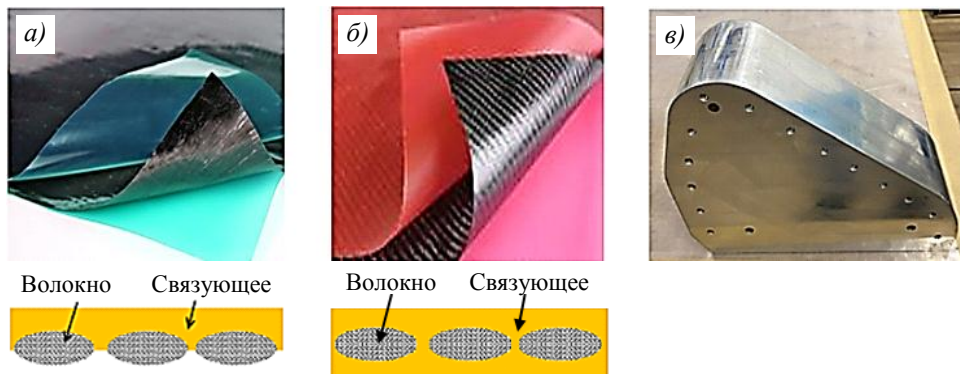


Рис. 4. Семипрег (а), препрег (б) и оснастка для формования полимерного композиционного материала (в)

Основное отличие семипрега от препрега заключается в наличии свободного не-пропитанного дренирующего слоя тканого наполнителя.

Для изготовления указанных материалов используется равнопрочная ткань марки ВТкУ-2.200 (препрег ВКУ-39/ВТкУ-2.200, семипрег ВКУ-69/ВТкУ-2.200), однонаправленная – марки ВТкУ-3 (семипрег марки ВКУ-69) и расплавные эпоксидные связующие разработки и производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ марок ВСЭ-1212 и ВСЭ-68 [13–15], свойства которых приведены в табл. 1.

Связующее ВСЭ-1212 имеет более высокие прочностные характеристики благодаря наличию термопластичной составляющей. С другой стороны, именно наличие термопласта приводит к увеличению вязкости связующего при температуре переработки, что не затрудняет формовку материала в автоклаве, но может создать дополнительные ограничения при вакуумном формовании.

Таблица 1

Свойства расплавных эпоксидных связующих марок ВСЭ-1212 и ВСЭ-68

Показатель	Значения показателей для связующих	
	ВСЭ-1212	ВСЭ-68
Максимальная температура отверждения, °С	180	180
Температура стеклования T_{gdry} , °С	187	193
Вязкость связующего в семипреге при температуре переработки 100 °С, Па·с	18	10
Предел прочности, МПа: при изгибе при растяжении	140	137
	90	79
Степень отверждения при температуре 180 °С, %	99	99

Необходимо отметить, что данные материалы имеют максимальную температуру отверждения 180 °С и разработаны для изготовления средне- и высокопрочных конструкций с максимальной температурой эксплуатации 120 °С. Цель данной работы – определение возможности применения технологии вакуумного формования препрегов для изготовления средств реабилитации инвалидов. Для подобных изделий такая высокая рабочая температура не является актуальной. Кроме того, высокая температура отверждения приводит к дополнительной излишней энергонасыщенности процесса переработки препрега, что также не является необходимым для предполагаемой области применения изделий из этого материала. Из практики известно, что температура переработки материалов до 120–130 °С является «удобной» для потребителя, одновременно обеспечивает высокий уровень физико-механических свойств ПКМ и снижает энергопотребление технологического процесса. Соответственно, для развития данного направления целесообразно подобрать или разработать материалы для вакуумного формования именно в этой температурной области переработки и эксплуатации.

Основные свойства использованных в работе материалов (препрега и семипрегов) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства препрега марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и семипрегов марок ВКУ-69, ВКУ-69/ВТкУ-2.200

Показатель	Значения показателей для материала		
	ВКУ-39/ВТкУ-2.200	ВКУ-69	ВКУ-69/ВТкУ-2.200
Массовая доля связующего, %	36	34	35
Поверхностная плотность, г/м ²	315	310	315
Толщина монослоя углепластика, мм	0,22	0,2	0,2
Температура стеклования, °С	185	190	190
Плотность углепластика, г/см ³	1,56	1,52	1,56
Предел прочности углепластика (для вакуумного формования), МПа: при растяжении при изгибе при сжатии	915	2120	780
	1000	1470	925
	785	1040	620

В работе использована технология вакуумного формования препрегов, позволяющая обеспечить получение высококачественных изделий из ПКМ с гораздо меньшими энергозатратами и высокой экономической эффективностью за счет более низкой стоимости оборудования относительно традиционного и привычного автоклавного формования. Кроме того, необходимо помнить, что автоклав является устройством, относящимся к опасным производственным объектам, что подразумевает организацию рабочего места и проведение специализированных мероприятий по осуществлению производственного контроля за безопасной эксплуатацией оборудования, работающего под избыточным давлением, в соответствии с требованиями Ростехнадзора [16].

Организация процесса вакуумного формования препрегов отличается простотой и требует минимального оснащения специализированным оборудованием (термошкаф, обеспечивающий необходимый уровень температуры для отверждения используемого в препреге (семипреге) связующего, и вакуумный насос достаточной мощности для дегазации воздушной фазы из технологического пакета). Материалы для сборки технологического пакета являются стандартными для организации процесса вакуумного формования при таких уровнях температур и вполне доступны на рынке РФ.

Сборка технологического пакета должна обеспечить первоначально оптимальную схему отвода воздушной фазы путем укладки жертвенной ткани и дренажа в соответствии с геометрическими параметрами получаемого изделия. При сборке пакета необходимо учитывать возможные ограничения оттока связующего из слоев препрега для исключения «пересушки» получаемого ПКМ [17, 18].

В работе [19] показано, что в случае оптимальной организации процесса изготовления ПКМ безавтоклавным формованием препрега реально получать изделия с физико-механическими свойствами, приближенными к свойствам «автоклавного» аналога. Использование семипрега при этом методе формования в еще большей степени упрощает сам подход к получению низкопористого материала (так как наличие пор в первую очередь определяет механические характеристики материала) – присутствие непропитанного фрагмента тканого наполнителя обеспечивает облегченную дегазацию летучих компонентов и более короткое время вакуумирования в сравнении с препреговым аналогом [20–22].

Результаты и обсуждение

В процессе оценки возможности применения технологии вакуумного формования препрегов для изготовления средств реабилитации инвалидов, в частности конструктивно-подобного элемента (КПЭ) фрагмента модуля стопы, использованы семипреги и препрег на основе углеродных наполнителей.

С учетом более быстрого и простого проведения процесса вакуумирования семипрегов экспериментальные работы начаты именно с этих материалов. В КПЭ изделия использовано чередование слоев армирующего наполнителя: в качестве внешних покровных слоев применен семипрег на основе равнопрочной ткани, в качестве основных внутренних – на основе однонаправленного наполнителя.

С учетом разнотолщинности изделия проведен раскрой семипрега на необходимое количество фрагментов различной длины при фиксированной ширине выкладываемого материала (рис. 5).



Рис. 5. Раскрой семипрегов перед выкладкой на формообразующую оснастку

На рис. 6 приведены изображения процесса подготовки технологического вакуумного пакета с использованием семипрегов на основе как равнопрочной ткани, так и однонаправленного наполнителя.

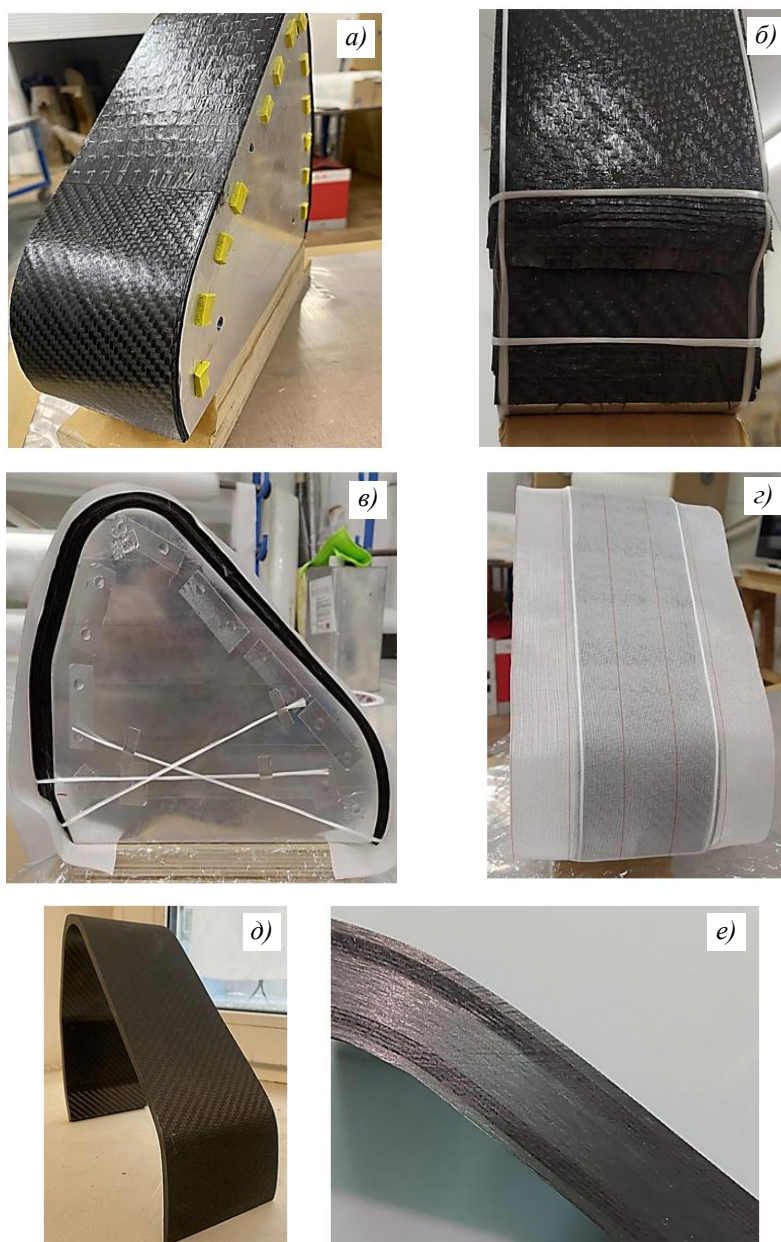


Рис. 6. Изготовление конструктивно-подобного элемента фрагмента модуля стопы с использованием семипрегов: *a* – сборка слоев наполнителя на оснастке; *б* – организация вакуумирования и отвода летучих компонентов в вакуумном пакете; *в*, *г* – размещение жертвенной ткани для обеспечения вакуумирования; *д* – изделие после торцовки; *е* – послойное чередование равнопрочных и однонаправленных слоев семипрегов

Как указано ранее, при изготовлении ПКМ с использованием процесса безавтоматического формования исключительно важны максимальное удаление воздушной фазы из технологического пакета и, соответственно, грамотная организация его сборки для газоотведения по всей площади выложенного углеродного материала. В случае использования семипрега ситуация упрощается за счет наличия в монослое материала сухой,

не пропитанной связующим составляющей тканого наполнителя (рис. 4). Выкладка жертвенной ткани и дренажного материала дополнялась размещением в сборке сухого стекловолокна, которое дополнительно обеспечивало на этапе вакуумирования отвод воздушной фазы из технологического пакета.

Отверждение семипрегов проводили по ранее отработанному ступенчатому режиму с максимальной температурой нагрева 180 °С [8]. Необходимо отметить, что важным фактором, влияющим на качество изготовления детали, является точный контроль температуры в процессе отверждения материала, в частности проведение прогрева с учетом данных не только термодары термошкафа, но и термодары, размещенной на оснастке. Такой дополнительный контроль тем более является актуальным в случае использования массивной металлической оснастки с высокой теплоемкостью, время прогрева и, соответственно, реальная температура которой значительно отличаются от показателей термодары шкафа.

В результате проведенного подбора оптимальной схемы дегазации вакуумного технологического пакета получен образец КПЭ. После торцовки образца проведен ультразвуковой контроль эхоимпульсным методом в ручном режиме с целью оценки сплошности материала на межслойные расслоения и иные дефекты. Показано, что в плоских частях КПЭ фрагмента модуля стопы отсутствуют дефекты и расслоения (рис. 7).

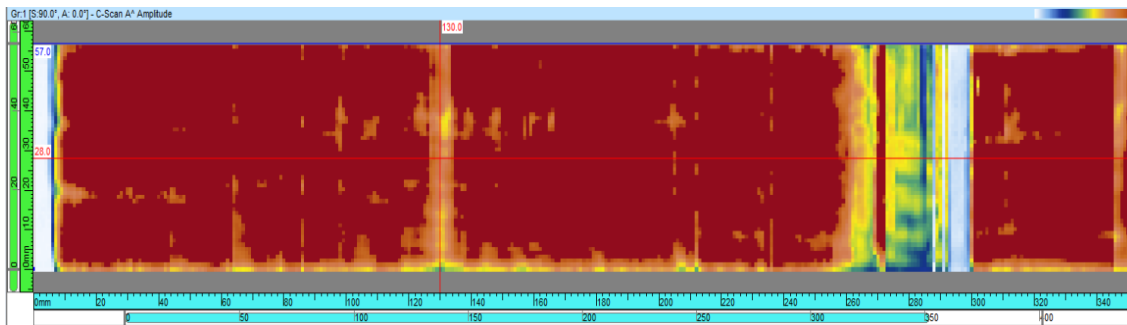


Рис. 7. Изображение C-скана образца углепластика конструктивно-подобного элемента фрагмента модуля стопы, изготовленного с использованием семипрегов

В зонах перегиба изделия, полученного данным способом, проведение оценки затруднительно, поскольку используемый датчик ультразвукового контроля не обеспечивал полного контакта с поверхностью исследуемой пластины, в этих зонах фрагменты изображения окрашены в другой цвет. Для корректного и полного определения качества изготовления КПЭ сложной формы необходимо использовать иные способы контроля, например рентгеновскую компьютерную томографию, результаты которой не зависят от кривизны поверхности исследуемого образца. Однако в данном случае цель подробного исследования КПЭ не ставилась, полученный результат подтвердил бездефектность и сплошность материала в изученных зонах.

Аналогичным образом проведена работа по изготовлению КПЭ фрагмента модуля стопы из препрега вакуумным формованием. В данном случае использован только один материал на основе равнопрочной углеродной ткани, который раскроен на необходимое количество фрагментов различной длины при фиксированной ширине. В качестве оснастки применяли менее материал- и теплоемкий образец, предоставленный ООО «Анатомикс Бионическая Лаборатория».

На рис. 8 приведены изображения процесса изготовления КПЭ фрагмента модуля стопы с использованием препрега.



Рис. 8. Изготовление конструктивно-подобного элемента фрагмента модуля стопы с использованием препрега: *а, б* – сборка слоев наполнителя на внешней и внутренней сторонах оснастки; *в* – образование складки и «клюва» в материале при формовании без верхней цулаги; *г* – вакуумный пакет после проведения отверждения; *д* – отформованный образец

Следует отметить, что ввиду особенностей материалов (полная пропитка препрега и частичная пропитка семипрега) поведение сборок слоев в технологическом пакете оказалось различным. Семипрег при формовании равномерно распределился по оснастке, в зоне перегиба заметные сдвиги и иные дефекты не образовались. В случае препрега пришлось использовать дополнительную «ответную» цулагу при формовке, поскольку без нее при повышении температуры, когда связующее при снижении вязкости начинало течь, верхние слои материала сдвигались и собирались складкой наподобие «клюва», что существенно искажало форму изделия (рис. 8, *в*). Попытка компенсировать эти дефекты за счет сборки вакуумного пакета на внутренней стороне оснастки не увенчалась успехом, расслоения и сдвиг материала происходили, но в меньшей степени.

Использование второй оснастки позволило компенсировать нагрузки, возникающие в материале, и обеспечило изготовление бездефектного материала.

На рис. 8, з видно вытекание связующего в жертвенный слой. Это обычное явление при таком способе формования, когда периметр выложенных слоев препрега не «глушится» герметизирующим жгутом, а позволяет проводить предварительное вакуумирование сборки материала в технологическом пакете, в отличие от автоклавного формования, оставляя некоторое количество газовой фазы внутри пакета. При высоком давлении оставшаяся газовая фаза сожмется до приемлемой величины объемной доли пор в ПКМ.

Как и в случае использования семипрегов, ультразвуковой контроль эхоимпульсным методом в ручном режиме показал отсутствие дефектов и расслоений в плоских частях КПЭ фрагмента модуля стопы (рис. 9), в зоне перегиба использование данного метода не является корректным.

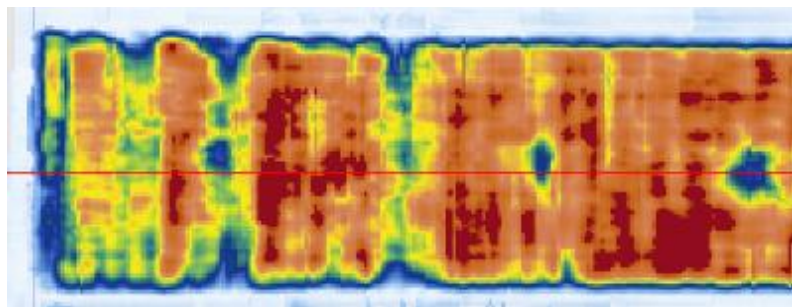


Рис. 9. Изображение С-скана образца углепластика конструктивно-подобного элемента фрагмента модуля стопы, изготовленного с использованием препрега

Заключения

Оценка возможности применения технологии вакуумного формования с использованием разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ материалов (препрега и семипрегов) для изготовления средств реабилитации инвалидов показала реализуемость этого подхода при изготовлении КПЭ модуля стопы и может быть транспонирована более широко на изготовление иных изделий в этой отрасли. Показаны отличия поведения сборки слоев в технологическом пакете препрега и семипрегов при отверждении (образование складки еще не отвержденного материала). Указан возможный путь решения этой проблемы. Проведение ультразвукового контроля эхоимпульсным методом в ручном режиме показало отсутствие дефектов и расслоений в углепластиках КПЭ на основе как препрега, так и семипрегов.

Применение процесса вакуумного формования в промышленности при изготовлении различных образцов конструкций обеспечит переход к качественно новым технологическим процессам и использованию современных перспективных отечественных материалов, а также будет способствовать сокращению разрыва между российскими и зарубежными конкурентными технологиями.

Для реализации вакуумного формования с использованием рассмотренных материалов при изготовлении средств реабилитации инвалидов целесообразно добиться снижения температуры формования углепластиков до достаточных в указанной области применения и обеспечить стоимость материалов, конкурентную на рынке РФ.

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. 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.
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. 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.
4. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 31.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. 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.
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В., Губин А.М. Полимерные композиционные материалы и технологии в автомобилестроении (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
8. 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: 02.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
9. 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.
10. Garschke C., Weimer C., Parlevliet P.P., Fox B.L. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. Vol. 43. Is. 6. P. 935–944.
11. Levy A., Hubert P. Vacuum-bagged composite laminate forming processes: Predicting thickness deviation in complex shapes // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 126. P. 105568.
12. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs // Polymer Composites. 2017. Vol. 38. P. 2016–2025.
13. 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: 01.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
14. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2020. № 12 (94). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
15. 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.
16. 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).

17. 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: 01.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
18. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepregs – material properties, process phenomena and manufacturing considerations // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 70. P. 132–154.
19. Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Сафронов А.М., Гончаров В.А., Мищун М.И. Безавтоклавное формование препрегов // *Конструкции из композиционных материалов*. 2022. № 1 (165). С. 29–34.
20. Farhang L., Fernlund G. Experimental study of void evolution in partially impregnated prepregs // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 54. P. 1511–1523.
21. Levy A., Kratz J., Hubert P. Air evacuation during vacuum bag only prepreg processing of honeycomb sandwich structures: In-plane air extraction prior to cure // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 68. P. 365–376.
22. Schechter S.G.K., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Air evacuation and resin impregnation in semi-prepregs: effects of feature dimensions // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2020. Vol. 6. Is. 2. P. 101–114.

References

1. 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.
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. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 31, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
5. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 720 p.
7. Valueva M.I., Evdokimov A.A., Nacharkina A.V., Gubin A.M. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 05, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-53-65.
8. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D., Tkachuk A.I. Semipreg 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 02, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-85-99.
9. 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.
10. Garschke C., Weimer C., Parlevliet P.P., Fox B.L. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, vol. 43, is. 6, pp. 935–944.
11. Levy A., Hubert P. Vacuum-bagged composite laminate forming processes: Predicting thickness deviation in complex shapes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, p. 105568.

12. Ma Y., Centea T., Nutt S.R. Defect reduction strategies for the manufacture of contoured laminates using vacuum BAG-only prepregs. *Polymer Composites*, 2017, vol. 38, pp. 2016–2025.
13. 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: October 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
14. Sidorina A.I., Safronov A.M., Kutsevich K.E., Klimenko O.N. Carbon fabrics for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 16, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58.
15. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
16. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 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).
17. Puzyretskiy E.A., Donetski K.I., Shabalin L.P., Karavaev R.Yu., Savinov D.V. Theoretical and experimental study of the vacuum forming of semipregs 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: October 01, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-109-121.
18. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepregs – material properties, process phenomena and manufacturing considerations. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, vol. 70, pp. 132–154.
19. Donetskiy 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.
20. Farhang L., Fernlund G. Experimental study of void evolution in partially impregnated prepregs. *Journal of Composite Materials*, 2019, vol. 54, pp. 1511–1523.
21. Levy A., Kratz J., Hubert P. Air evacuation during vacuum bag only prepreg processing of honeycomb sandwich structures: In-plane air extraction prior to cure. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 68, pp. 365–376.
22. Schechter S.G.K., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Air evacuation and resin impregnation in semi-prepregs: effects of feature dimensions. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, vol. 6, is. 2, pp. 101–114.

Информация об авторах

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

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

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

Стретьячук Игорь Валерьевич, заместитель генерального директора, к.э.н., ООО «Научно-производственная фирма Орто-Космос», info@orto-kosmos.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

Igor V. Stretyachuk, Deputy Director General, Candidate of Sciences (Econ.), LLC Scientific and Production Firm Orto-Cosmos, info@orto-kosmos.ru

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

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.11.2025.

The article was submitted 01.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.11.2025.