

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕЗАВТОКЛАВНЫМ ФОРМОВАНИЕМ ПРЕПРЕГОВ

А.И. Ткачук¹, П.А. Кузнецова¹, К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Карavaев¹

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

Аннотация. *Переработка полимерных композиционных материалов способами безавтоклавного формования находит все более широкое применение при изготовлении изделий самого различного применения. Для получения высококачественных композитов необходимо использовать технологические процессы, обеспечивающие прогнозируемые и оптимальные свойства материала. Обзор посвящен технологическим особенностям изготовления полимерных композиционных материалов безавтоклавным формованием препрегов.*

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

Для цитирования: Ткачук А.И., Кузнецова П.А., Донецкий К.И., Карavaев 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

Scientific article

SOME TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING POLYMER COMPOSITE MATERIALS BY NON-AUTOCCLAVE MOLDING OF PREPREGS

A.I. Tkachuk¹, P.A. Kuznecova¹, K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹

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

Abstract. *The processing of polymer composite materials by methods of non-autoclave molding is increasingly used in the manufacture of products for a wide variety of applications. To carry out the process of manufacturing the material and obtaining its maximum properties, it is necessary to use technological processes that ensure the manufacture of materials with predictable and optimal properties. The review is devoted to the technological features of the manufacture of polymer composite materials by non-autoclave molding of prepregs.*

Keywords: *vacuum forming, prepreg, semipreg, binder, technological package, vacuuming, impregnation, polymer composite materials*

For citation: Tkachuk A.I., Kuznecova P.A., Donetskiy 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-44-55.

Введение

Изделиям из полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготовленным из препрегов на основе углеродных и стеклянных волокон, уделяется особое внимание в различных отраслях промышленности благодаря их легкости [1–3]. Рынок препрегов в значительной степени расширяется в первую очередь за счет аэрокосмического сектора, однако в авто- и машиностроении его доля также постоянно увеличивается.

Как в авиационной, так и в других высокотехнологичных отраслях промышленности растет потребность в новых экономичных и экономически целесообразных изделиях. Это вызывает необходимость постоянного обновления как самих материалов для этих изделий, так и технологий их изготовления [1–3]. По сравнению с металлическими материалами ПКМ, изготовленные с использованием препреговых технологий, обладают рядом преимуществ, таких как выдающееся соотношение механических свойств и массы, высокие значения удельной прочности и жесткости, сопротивления усталости [4–6].

Кроме того, наблюдающийся в мировой промышленности переход на электромобили открывает новые возможности применения препрегов. С использованием ПКМ изготавливаются элементы кузова и салона, корпуса для аккумуляторов и другие комплектующие. При этом разработчикам изделий из ПКМ необходимо достичь повышения энергоэффективности процесса производства автомобильных компонентов и запаса емкости аккумуляторов, а также соответствия упруго-прочностных показателей требованиям нормативных актов. Таким образом, с развитием высокотехнологичных отраслей промышленности наблюдается расширение сфер применения данных материалов, что в свою очередь стимулирует исследования по разработке новых связующих и препрегов на их основе.

Однако достаточно высокая стоимость изготовления полимерных материалов, особенно в гражданских секторах, где важна экономическая эффективность производства, является главным тормозящим фактором их более широкого применения. Препреги на основе углеродных наполнителей обычно стоят дороже, чем традиционные материалы, такие как металлы или термопласты. Стоимость химических компонентов и технологической оснастки, затраты на оборудование и утилизацию отходов, а также жесткие технологические регламенты являются основными причинами высокой стоимости конечных изделий.

Вследствие пандемии Covid на рынке углеродных и стеклянных ПКМ наблюдался глобальный экономический спад, вызванный в первую очередь остановкой или снижением активности ряда производств, а также значительными проблемами с логистикой компонентов и комплектующих во время карантина. Основные потребители композиционных материалов (авиационная и автомобильная промышленности) были вынуждены снизить темпы производства в связи со снижением объемов заказов. Однако в настоящее время рынок препрегов уверенно набирает темпы развития в связи с увеличением доли государственных заказов на производство высокотехнологичной продукции не только в гражданской, но и военной отраслях, а также с повышенным интересом общества к проблемам экологии.

Основными разработчиками технологий и производителями на мировом рынке препрегов являются компании Mitsubishi Rayon Co. Ltd., PRF Composite Materials, Barrday Corporation, GMS Composites, Hankuk Carbon, ABC Composites, Solvay, Teijin Ltd., Park Electrochemical Corporation, Axiom Materials, HC Composite, Kineco, Taiwan First Li-Bond Co. Ltd., North Thin Ply Technology, TCR Composites, Toray Industries Inc., Hexcel Corporation, Gurit Holding AG, Royal Tencate N.V., SGL Group и др. В России производством препрегов на различных типах наполнителей занимаются НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «Препрег-СКМ» и ООО «Итекма».

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

Материалы и методы

К основным отраслям потребления препрегов, для которых необходимы легкие и прочные материалы, относятся:

- авиакосмический сектор;
- автомобилестроение (спорткары, элементы корпуса и интерьера);
- производство спортивного инвентаря (клюшки для хоккея, гольфа, теннисные ракетки и рамы для самокатов и велосипедов);
- морская индустрия (каркасы спортивных лодок и яхт);
- военный сектор (корпуса ракет, военной техники и бронетехники);
- медицинская сфера (разработка современного оборудования, биопротезирование);
- производство нового промышленного оборудования;
- строительная индустрия;
- ветро- и водородная энергетика (лопасти ветрогенераторов, топливные баки для водорода и топливных элементов).

В авиакосмической и военной промышленности наиболее распространенным методом изготовления высококачественных ПКМ является автоклавирование. Высокое давление используется для удаления излишков смолы вместе с захваченным воздухом, подавления роста пустот (<1 % (объемн.)) и достижения высокой массовой доли волокна (55–60 % (объемн.)) [7–11]. Однако традиционный автоклавный процесс имеет ряд недостатков: значительные капиталовложения, длительное время производства необходимого оборудования, низкая энергоэффективность и ограничения по размеру получаемых деталей [12, 13]. Это привело к необходимости разработки альтернативных методов отверждения, позволяющих организовать недорогой и высококачественный производственный процесс, таких как вакуумное литье под давлением смолы, инфузия композитной смолы Seeman, инфузия пленки связующего, вакуумное формование препрегов (VBO – vacuum bag only) и т. д. [14–16].

Однако большинство методов инъекции связующего обеспечивает меньшую повторяемость производственного процесса по сравнению с автоклавированием. Кроме того, применение дисперснонаполненных полимерных частиц в качестве упрочняющего агента для улучшения вязкости разрушения ограничено из-за увеличения вязкости связующего и фильтрации частиц на поверхности волокнистого наполнителя.

Ведущие разработчики авиационных изделий, такие как фирмы McDonnell Douglas, EADS и Boeing, проводят новаторские исследования по внедрению безавтоклавных технологий (OoA – Out-of-Autoclave process) изготовления деталей из ПКМ. Одним из таких методов, использующих аналогичные препреговые связующие, является вакуумное формование детали из листов выложенного по форме препрега [17]. Метод гарантирует точный контроль объемной доли и геометрических размеров волокон, а также низкую пористость. Переход от автоклавирования к VBO позволяет провести более экономичный и менее трудоемкий производственный процесс, обеспечивающий повышенную гибкость размеров детали. При этом появляется возможность масштабирования процесса и изготовления деталей из ПКМ на любых производственных площадках (не имеющих автоклава) [18, 19]. При использовании данной технологии, например, для изготовления кузова спортивных электрокаров возможно применение крупногабаритных и недорогих сухожаровых шкафов, тепловых пушек и др. Однако низкое качество вакуума (<0,1 МПа), плохая откачка воздуха и/или высокая влажность ухудшают упруго-прочностные характеристики изделий из-за появления дефектов

(пористости, не пропитанных связующим сухих зон в наполнителе). Поэтому первоначально такие материалы предлагали использовать для получения слабонагруженных конструкций [20]. Так, каждый процент содержания пустот в композите, вплоть до общего количества пустот $\sim 4\%$, приводит к снижению межслойной прочности при сдвиге на $\sim 7\%$ независимо от вида смолы, типа волокна или способа обработки его поверхности. После формообразования связующего в технологическом пакете остаются захваченные воздушные пузырьки, что приводит к потенциально высокой пористости ($>1\%$) [21–24].

Таким образом, для успешной реализации требуемых характеристик ПКМ, в первую очередь снижения пористости, необходимы методы, обеспечивающие условия для оптимального вакуумирования препрега. Снизить пористость позволяют варьирование схемы нанесения для подачи связующего на волокнистый наполнитель, корректировка режимов при переработке препрегов (подбор температур для вакуумных подформовок выложенных слоев препрега и режима отверждения), применение различных схем сборки и укладки технологического материала в вакуумном пакете.

Результаты и обсуждение

Разработано множество способов, позволяющих существенно улучшить качество изготавливаемых вакуумным формованием препрегов и пластиков на их основе. Например, авторы работы [25] исследовали зависимость пористости и прочностных характеристик *in situ* и предложили проводить два дополнительных цикла отверждения, что в итоге увеличило прочность ПКМ при растяжении на 26% . Недостатком рекомендуемого способа является более длительное время отверждения.

Среди методов подготовки вакуумного пакета традиционно используется сборка с одним вакуумным мешком, которая создает единую вакуумную среду для проведения предварительного вакуумирования. Этот метод можно использовать для изготовления изделий из ПКМ с плоской или сложной формой [26, 27].

Еще один способ – метод модифицированного одиночного вакуумного пакета – также подразумевает использование одного пакета для проведения вакуумирования, но нуждается в применении металлических или полимерных усилителей, уплотнительных листов или нажимных полос в углах сложных конструкций [28]. Мостиковый эффект в структурах сложной формы, где слои препрега не полностью соответствуют нужной форме, как раз предотвращается с помощью данного метода.

В методе двойного вакуумного пакета используют две вакуумные среды либо жесткую камеру [29, 30], что позволяет с большей вероятностью получить материал необходимого качества. При формовании ПКМ между обоими мешками поддерживается разница давлений для создания эффекта раздувания, т. е. 100 и 95 кПа для внешнего и внутреннего мешков соответственно. В этом случае приложение давления 100 кПа (максимальное значение) считается полным вакуумом, <100 кПа – частичным вакуумом. При этом используется парциальное давление 95 кПа во внутренней среде и полное давление 100 кПа во внешней среде при В-стадии для создания эффекта раздувания во внутренней среде. Это позволяет удалить захваченные летучие вещества (фаза дегазации). Следует принять во внимание, что внешний мешок продувается до 1 ат, а во внутренней среде создается полный вакуум для окончательной консолидации (фаза уплотнения).

Некоторые исследователи решили проблему недостаточного давления при изготовлении ПКМ методом VBO, предложив альтернативные способы создания избыточного давления, например использование мощных постоянных магнитов и формы для горячего прессования [31, 32]. Производство материалов с магнитной фиксацией позволяет

снизить затраты, связанные с приобретением, оснасткой и обслуживанием оборудования, по сравнению, например, с горячим прессованием. Однако основным недостатком этого процесса является то, что давление сжатия с использованием постоянных магнитов снижается экспоненциально при увеличении толщины укладки, что уменьшает его эффективность при изготовлении более толстых ламинатов.

Другой технологией снижения пористости ПКМ является создание «дышащих» препрегов (семипрегов), т. е. частично пропитанных материалов, в которых остаются сухие волокна, называемые инженерными вакуумными каналами. Сами каналы при этом пропитываются при повышении температуры и расплавлении связующего. Такой подход позволил снизить пористость получаемых изделий с 5 % до практически нулевых значений. Таким образом удалось получить монолитные материалы, которые используются при изготовлении высокопрочных крупногабаритных конструктивных элементов авиационной техники различного назначения или, например, лопастей ветряных электрогенераторов [33, 34]. В настоящее время на мировом рынке существует огромное разнообразие семипрегов, которые производятся ведущими в отрасли композиционных материалов компаниями, такими как Hexcel, Cytac, Toray Industries Inc., Gurit Holding AG и др.

Для повышения надежности таких препрегов, особенно в случае проблематичности достижения устойчивого вакуума и при изготовлении нестандартных крупногабаритных изделий, разрабатываются новые технологии, обеспечивающие более стабильную дегазацию материалов. Так, разработаны частично пропитанные материалы либо с сухим волокном в виде каналов для удаления воздуха, либо с полностью сухим волокном, находящимся между пленками связующего. Удаление воздуха, захваченного между слоями препрегов во время процесса выкладки, обеспечит низкую пористость деталей, отвержденных VBO. Такие препреги имеют области как богатые смолой, так и сухие [35, 36]. Захваченные газы мигрируют к краям углепластика во время вакуумных подформовок, при повышении температуры смола заполняет каналы, в результате чего обеспечивается изготовление материала без пор. Захваченные газы должны иметь возможность выходить через ламинат препрега в дренаж, поэтому граница вакуумной сборки должна быть проницаемой, соединять вакуумный насос и технологический пакет с препрегом без избыточного потока смолы. Кроме того, важно наличие инженерных перемычек (фитилей) по краям для обеспечения дегазации. Для разделения углепластика и проницаемой мембраны (при ее использовании) можно применять разделительные пленки (перфорированные или неперфорированные) или дополнительные проницаемые слои. Зачастую семипреги рассматривают как материалы с непостоянным распределением связующего, что улучшает проницаемость в толще изделия и увеличивает надежность процесса в сравнении с получением аналогичных вакуумных препрегов [37–39]. Обычно при изготовлении изделий к таким материалам добавляют поверхностный слой связующего для придания лучшей финишной поверхности. Использование таких препрегов также позволяет сократить продолжительность выкладки изделий по сравнению с аналогичными препрегами и в некоторых случаях улучшить драпируемость заготовок.

Дефекты, возникающие при производстве в автоклаве, можно устранить при проведении безавтоклавного процесса, поскольку отверждение препрега в этом случае происходит при низком давлении. Даже композиты с сотовым наполнителем могут быть отверждены таким образом, в отличие от автоклавирования, при котором материал разрушается под действием высокого давления. Интересно, что общую стоимость изделий можно сократить на ~25 % с помощью процессов безавтоклавного формования препрегов и семипрегов ввиду его простоты и дешевизны в применении [40].

Существует также ряд технологических проблем при производстве ПКМ сложной формы. Наиболее частой проблемой является отклонение толщин угловых и центральных областей в пластиках сложной формы [41, 42]. При этом самые высокие градиенты толщины (утолщение или утончение углов) зависят от ориентации слоев и кривизны форм. Дефекты, вызванные производством, могут усугубиться с увеличением размеров деталей и геометрической сложности.

Однородность толщины в угловых областях и центральной части является общепринятой характеристикой качества для изделий из ПКМ сложной формы, поскольку ее легко контролировать [43–45]. Основной причиной изменения толщины композитов со сложной структурой является разница в возникающем давлении, действующем на угловые и центральные области. Исследования показали, что разнотолщинность возникает главным образом из-за разных коэффициентов линейного теплового расширения матрицы и волокна при переработке препрегов. Деформация материала напоминает эффект пружины и, соответственно, называется пружинным эффектом. Пружинный эффект в конечном изделии создает проблемы при окончательной сборке из-за плохой посадки с сопрягаемыми конструкциями, что обычно устраняется при проектировании расчетной компенсацией. Определенные характеристики материалов, такие как анизотропия механических свойств в процессе отверждения, также являются причиной пружинного эффекта. Предполагается, что на пружинный эффект влияют как внутренние, так и внешние параметры. Внутренние параметры – это физические характеристики ПКМ, тогда как внешние – связаны с производственным процессом и используемой оснасткой. Из-за возникновения остаточных напряжений и искажений на пружинный эффект композитных ламинатов также влияет взаимодействие оснастки и изготавливаемой детали. Металлические оснастки расширяются больше, чем ПКМ во время отверждения, в свою очередь вызывая изменение размеров полимерного материала [46, 47].

Несмотря на некоторые уже успешно решаемые технологические сложности, в настоящее время широкий спектр препрегов и семипрегов сертифицирован для использования в аэрокосмическом производстве. В зависимости от используемого связующего эти препреги часто можно отверждать при более низких температурах в обычном термощафу, что позволяет значительно сократить общую стоимость получаемых изделий.

Наиболее широкое применение безавтоклавное формование препрегов и семипрегов нашло в зарубежной аэрокосмической отрасли. Реализованы многие проекты, в которых эти материалы используются такими крупными разработчиками и потребителями ПКМ, как Lockheed Martin, Boeing, NASA, а также крупные проекты, финансируемые фондом DARPA, при изготовлении разнообразных (в том числе и высоконагруженных) элементов для аэрокосмической отрасли как военного, так и гражданского назначения [48].

В последние 20 лет в отечественной промышленности эпоксидные связующие и материалы на их основе нашли ограниченное применение для вакуумного формования ПКМ из препрегов, несмотря на то, что впервые они начали применяться еще в СССР. Однако в последние годы появились связующие и препреги на их основе отечественного производства, пригодные для вакуумного формования, разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «ИНУМиТ», АО «Препрег-СКМ». Это свидетельствует о начале использования перспективных безавтоклавных технологий для производства изделий из ПКМ и в нашей стране [49, 50].

Заключения

Технология вакуумного формования препрегов развивается в настоящее время быстрыми темпами и может существенно снизить стоимость процесса изготовления

крупногабаритных и сложнопрофильных изделий с сохранением высокого уровня их свойств. Однако недостаточное уплотнение с помощью вакуумного мешка приводит к более высокой склонности к образованию пор и расслоений по сравнению с традиционным отверждением в автоклаве. Таким образом, для успешной реализации требуемых характеристик ПКМ, в первую очередь снижения пористости, необходимы глубокое понимание схемы организации оптимальной сборки вакуумного пакета, правильный выбор связующего, отвечающего требованиям использования именно в вакуумном формовании, необходимой продолжительности предварительного вакуумирования и температурного режима отверждения материала. Кроме того, реальными инструментами для получения низкопористого пластика являются варьирование схемы нанесения связующего на волокнистый наполнитель, а также применение различных схем укладки технологического материала.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерства) в рамках Соглашения № 075-11-2024-007 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 июля 2023 г. 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. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions // Applied Composite Materials. 2010. Vol. 17. Is. 2. P. 63–67.
5. Lachaud F., Espinosa C., Michel L. et al. Modelling strategies for predicting the residual strength of impacted composite aircraft fuselages // Applied Composite Materials. 2015. Vol. 22. Is. 6. P. 599–621.
6. Alderliesten R.C. Critical review on the assessment of fatigue and fracture in composite materials and structures // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 35. Is. 15. P. 370–379.
7. Grunenfelder L.K., Dills A., Centea T., Nutt S.R. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2017. Vol. 93. P. 88–99.
8. Aleksendri D., Carlone P., Cirovic V. Optimization of the temperature-time curve for the curing process of thermoset matrix composites // Applied Composite Materials. 2016. Vol. 23. Is. 5. P. 1047–1063.
9. Bodaghi M., Cristovao C., Gomes R., Correia N.C. Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Vol. 82. P. 88–99.
10. Marsh G. De-autoclaving prepreg processing // Plast Reinforced plastics. 2012. Vol. 56. Is. 5. P. 20–25.

11. Xu X., Wang X., Liu W. et al. Microwave curing of carbon fiber/bismaleimide composite laminates: material characterization and hot-pressing pretreatment // *Materials and Design*. 2016. Vol. 97. Is. 5. P. 316–323.
12. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepregs – effect of dissolved moisture // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70. Is. 16. P. 2304–2309.
13. Helmus R., Centea T., Hubert P., Hinterhölzl R. Out-of-autoclave prepreg consolidation: coupled air evacuation and prepreg impregnation modeling // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50. Is. 10. P. 1403–1413.
14. Garschke C., Weimer C., Parlevlie 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.
15. Han K., Jiang S., Zhang C., Wang B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000. Vol. 31. Is. 1. P. 79–86.
16. Li W., Krehl J., Gillespie J.W. et al. Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process // *Journal of Composite Materials*. 2004. Vol. 38. Is. 20. P. 1803–1814.
17. 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*. 2015. Vol. 70. P. 132–154.
18. Turner T.A., Harper L.T., Warrior N.A., Rudd C.D. Low-cost carbon-fibre-based automotive body panel systems: a performance and manufacturing cost comparison // *Proceedings IMechE. Part D: Journal Automobile Engineering*. 2006. Vol. 222. P. 53–62.
19. Murray J.J., Pappa E.J., Mamalis D. et al. Characterisation of carbon fibre reinforced powder epoxy composites for wind energy blades // *ECCM18: 18th European Conference on Composite Materials*. Athens, 2018. Art. 5.03-02.
20. Boyd J., Maskell R.K. Product design for low cost manufacturing of composites for aerospace applications // *Proceedings SAMPE conference*. California, 2001. P. 59–90.
21. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. P. 536.
22. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Коротков И.А. Некоторые особенности жидкостного формования полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 2 (50). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8.
23. Караваев Р.Ю., Городилова Н.А., Донецкий К.И. Изготовление полимерных композиционных материалов на основе семипрегов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 5 (123). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.
24. Хрульков А.В., Караваев Р.Ю., Городилова Н.А., Донецкий К.И. Некоторые причины образования пор в полимерных композиционных материалах (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 6 (124). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.
25. Takagaki K., Hisada S., Minakuchi S., Takeda N. Process improvement for out-of-autoclave prepreg curing supported by in-situ strain monitoring // *Journal of Composite Materials*. 2017. Vol. 51. P. 1225–1237.
26. Dong A., Zhao Y., Zhao X., Yu Q. Cure Cycle Optimization of Rapidly Cured Out-Of-Autoclave Composites // *Materials*. 2018. Vol. 11. P. 421.
27. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1998. Vol. 17. P. 286–318.
28. 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.
29. Sherwin G.R. Non-autoclave processing of advanced composite repairs // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1999. Vol. 19. P. 155–159.

30. Mujahid Y., Sallih N., Abdullah M.Z. A Comparison of Single-Vacuum-Bag and Double-Vacuum-Bag Methods for Manufacturing High-Quality Laminated Composites // Conference paper «Advances in Manufacturing Engineering». New York: Springer, 2020. P. 457–467.
31. Pishvar M., Amirkhosravi M., Altan M.C. Magnet assisted composite manufacturing: A novel fabrication technique for high-quality composite laminates // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. P. 159–169.
32. Amirkhosravi M., Pishvar M., Altan M.C. Improving laminate quality in wet lay-up/vacuum bag processes by magnet assisted composite manufacturing (MACM) // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 98. P. 227–237.
33. Grunenfelder L.K., Centea T., Hubert P., Nutt S.R. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 45. P. 119–126.
34. Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
35. Martinez P., Jin B.C., Nutt S. Droplet Spreading on Unidirectional Fiber Beds // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5. P. 13–15.
36. 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.
37. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Through thickness air permeability of prepregs during cure // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40. P. 1587–1596.
38. Edwards W.T., Martinez P., Nutt S.R. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2020. Vol. 6. Is. 4. P. 198–211.
39. Frost M., Solanki D., Mills A. Resin film infusion processing of carbon fibre composite automotive body panels // *SAMPE Journal*. 2003. Vol. 39. Is. 4. P. 44–49.
40. A kind of phenolic aldehyde panel honeycomb sandwich construction part forming method: pat. CN106608056B; appl. 21.11.16; publ. 03.05.17.
41. 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.
42. 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.
43. Naji M.I., Hoa S.V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: Curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution // *Journal of composite materials*. 2000. Vol. 34. P. 1710–1755.
44. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 1998. Vol. 17. P. 286–318.
45. Gu Y., Li M., Li Y., Zhang Z. Pressure transfer behaviour of rubber mould and the effects on consolidation of L-shape composite laminates // *Polymers and Polymer Composites*. 2010. Vol. 18. P. 167–174.
46. Hein R., Prussak R., Schmidt J. Phenomenological Analysis of Thermo-Mechanical-Chemical Properties of GFRP during Curing by Means of Sensor Supported Process Simulation // *Processes*. 2020. Vol. 8. P. 192.
47. Zappino E., Zobeiry N., Petrolo M. et al. Analysis of process-induced deformations and residual stresses in curved composite parts considering transverse shear stress and thickness stretching // *Composite Structures*. 2020. Vol. 241. P. 112057.
48. Fiorina M., Seman A., Castanié B. et al. Spring-in prediction for carbon/epoxy aerospace composite structure // *Composite Structures*. 2017. Vol. 168. P. 739–745.
49. Славин А.В., Донецкий К.И., Хрульков А.В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в авиационных конструкциях в 2025–2035 гг. (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 11 (117). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

50. 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: 01.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

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. The role of fundamental research in creating new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions. *Applied Composite Materials*, 2010, vol. 17, is. 2, pp. 63–67.
5. Lachaud F., Espinosa C., Michel L. et al. Modelling strategies for predicting the residual strength of impacted composite aircraft fuselages. *Applied Composite Materials*, 2015, vol. 22, is. 6, pp. 599–621.
6. Alderliesten R.C. Critical review on the assessment of fatigue and fracture in composite materials and structures. *Engineering Failure Analysis*, 2013, vol. 35, is. 15, pp. 370–379.
7. Grunenfelder L.K., Dills A., Centea T., Nutt S.R. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 93, pp. 88–99.
8. Aleksendri D., Carlone P., Cirovic V. Optimization of the temperature-time curve for the curing process of thermoset matrix composites. *Applied Composite Materials*, 2016, vol. 23, is. 5, pp. 1047–1063.
9. Bodaghi M., Cristovao C., Gomes R., Correia N.C. Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, vol. 82, pp. 88–99.
10. Marsh G. De-autoclaving prepreg processing. *Plast Reinforced plastics*, 2012, vol. 56, is. 5, pp. 20–25.
11. Xu X., Wang X., Liu W. et al. Microwave curing of carbon fiber/bismaleimide composite laminates: material characterization and hot-pressing pretreatment. *Materials and Design*, 2016, vol. 97, is. 5, pp. 316–323.
12. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepreps – effect of dissolved moisture. *Composites Science and Technology*, 2010, vol. 70, is. 16, pp. 2304–2309.
13. Helmus R., Centea T., Hubert P., Hinterhölzl R. Out-of-autoclave prepreg consolidation: coupled air evacuation and prepreg impregnation modeling. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 50, is. 10, pp. 1403–1413.
14. Garschke C., Weimer C., Parlevlie 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.
15. Han K., Jiang S., Zhang C., Wang B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, vol. 31, is. 1, pp. 79–86.
16. Li W., Krehl J., Gillespie J.W. et al. Process and performance evaluation of the vacuum-assisted process. *Journal of Composite Materials*, 2004, vol. 38, is. 20, pp. 1803–1814.
17. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepreps – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, vol. 70, pp. 132–154.

18. Turner T.A., Harper L.T., Warrior N.A., Rudd C.D. Low-cost carbon-fibre-based automotive body panel systems: a performance and manufacturing cost comparison. *Proceedings IMechE. Part D: Journal Automobile Engineering*, 2006, vol. 222, pp. 53–62.
19. Murray J.J., Pappa E.J., Mamalis D. et al. Characterisation of carbon fibre reinforced powder epoxy composites for wind energy blades. *ECCM18: 18th European Conference on Composite Materials*. Athens, 2018, art. 5.03-02.
20. Boyd J., Maskell R.K. Product design for low cost manufacturing of composites for aerospace applications. *Proceedings SAMPE conference*. California, 2001, pp. 59–90.
21. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2019, 536 p.
22. Dushin M.I., Donetski K.I., Karavaev R.Y., Korotkov I.A. Some features of liquid formation of polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2017, no. 2 (50), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 26, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8.
23. Karavaev R.Yu., Gorodilova N.A., Donetskiy K.I. Production of polymer composite materials based on semipregs. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.
24. Hrulkov A.V., Karavaev R.Yu., Gorodilova N.A., Donetskiy K.I. Some causes of voids formation in polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.
25. Takagaki K., Hisada S., Minakuchi S., Takeda N. Process improvement for out-of-autoclave prepreg curing supported by in-situ strain monitoring. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 51, pp. 1225–1237.
26. Dong A., Zhao Y., Zhao X., Yu Q. Cure Cycle Optimization of Rapidly Cured Out-Of-Autoclave Composites. *Materials*, 2018, vol. 11, p. 421.
27. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, vol. 17, pp. 286–318.
28. 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.
29. Sherwin G.R. Non-autoclave processing of advanced composite repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999, vol. 19, pp. 155–159.
30. Mujahid Y., Sallih N., Abdullah M.Z. A Comparison of Single-Vacuum-Bag and Double-Vacuum-Bag Methods for Manufacturing High-Quality Laminated Composites. *Conference paper «Advances in Manufacturing Engineering»*. New York: Springer, 2020, pp. 457–467.
31. Pishvar M., Amirhosravi M., Altan M.C. Magnet assisted composite manufacturing: A novel fabrication technique for high-quality composite laminates. *Polymer Composites*, 2019, vol. 40, pp. 159–169.
32. Amirhosravi M., Pishvar M., Altan M.C. Improving laminate quality in wet lay-up/vacuum bag processes by magnet assisted composite manufacturing (MACM). *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, vol. 98, pp. 227–237.
33. Grunenfelder L.K., Centea T., Hubert P., Nutt S.R. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 45, pp. 119–126.
34. *Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom*: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
35. Martinez P., Jin B.C., Nutt S. Droplet Spreading on Unidirectional Fiber Beds. *Journal of Composites Science*, 2021, vol. 5, pp. 13–15.
36. Schechter S.G.K., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Air evacuation and resin impregnation in semi-pregs: effects of feature dimensions. *Advanced manufacturing: polymer & composites science*, 2020, vol. 6, is. 2, pp. 101–114.
37. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Through thickness air permeability of prepregs during cure. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40, pp. 1587–1596.

38. Edwards W.T., Martinez P., Nutt S.R. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, vol. 6, is. 4, pp. 198–211.
39. Frost M., Solanki D., Mills A. Resin film infusion processing of carbon fibre composite automotive body panels. *SAMPE Journal*, 2003, vol. 39, is. 4, pp. 44–49.
40. *A kind of phenolic aldehyde panel honeycomb sandwich construction part forming method: pat. CN106608056B*; appl. 21.11.16; publ. 03.05.17.
41. 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.
42. 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.
43. Naji M.I., Hoa S.V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: Curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution. *Journal of composite materials*, 2000, vol. 34, pp. 1710–1755.
44. Hubert P., Poursartip A. A review of flow and compaction modelling relevant to thermoset matrix laminate processing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, vol. 17, pp. 286–318.
45. Gu Y., Li M., Li Y., Zhang Z. Pressure transfer behaviour of rubber mould and the effects on consolidation of L-shape composite laminates. *Polymers and Polymer Composites*, 2010, vol. 18, pp. 167–174.
46. Hein R., Prussak R., Schmidt J. Phenomenological Analysis of Thermo-Mechanical-Chemical Properties of GFRP during Curing by Means of Sensor Supported Process Simulation. *Processes*, 2020, vol. 8, p. 192.
47. Zappino E., Zobeiry N., Petrolo M. et al. Analysis of process-induced deformations and residual stresses in curved composite parts considering transverse shear stress and thickness stretching. *Composite Structures*, 2020, vol. 241, p. 112057.
48. Fiorina M., Seman A., Castanié B. et al. Spring-in prediction for carbon/epoxy aerospace composite structure. *Composite Structures*, 2017, vol. 168, pp. 739–745.
49. Slavina A.V., Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Prospects for the use of polymer composite materials in aircraft structures in 2025–2035 (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 01, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.
50. 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 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

Информация об авторах

Ткачук Александр Игоревич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кузнецова Полина Андреевна, техник I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Караваяев Роман Юрьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander I. Tkachuk, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Polina A. Kuznetsova, First Category Technician, Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Kirill I. Donetskii, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Roman Yu. Karavaev, Head of Sector, Kurchatov Institute Research Center – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.11.2024.
The article was submitted 13.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.11.2024.