

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В 2025–2035 гг. (обзор)*А.В. Славин¹, К.И. Донецкий¹, А.В. Хрульков¹*

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

Аннотация. Несмотря на проблемы, вызванные в настоящее время пандемией, авариями и введенными санкциями, планируется повышение объема производства конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной промышленности. Широкое применение ПКМ в конструкциях летательных аппаратов в 2025–2035 гг. будет сопровождаться усиленным внедрением автоматизированных процессов, математического моделирования на этапах проектирования, изготовления и жизненного цикла таких конструкций, использованием при их производстве комбинаций термопластичных и термореактивных матриц и металлических элементов, а также переходом на безавтоклавные технологии.

Ключевые слова: инфузия, смола, полимерный композиционный материал, автоклавное формование, безавтоклавная технология, автоматизация

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

Scientific article

PROSPECTS FOR THE USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT STRUCTURES IN 2025–2035 (review)*A. V. Slavin¹, K. I. Donetskii¹, A. V. Khrulkov¹*

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

Abstract. Despite the problems currently caused by the pandemic, accidents and sanctions, it is planned to increase the production of structures made of polymer composite materials (PCM) in the aircraft industry. Widespread use of PCM in aircraft structures in 2025–2035. will be accompanied by increased introduction of automated processes, mathematical modeling at the stages of design, manufacture and life cycle of such structures, the use of combinations of thermoplastic and thermosetting matrices and metal elements in their production, as well as the transition to autoclave-free technologies.

Keywords: infusion, resin, polymer composite material, autoclave molding, non-autoclave technology, automation

For citation: Slavin 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-81-92.

Введение

Без новых материалов и технологий невозможно создать как современные, так и перспективные летательные аппараты. Следует отметить, что 95 % всех материалов,

которые использовали при создании и функционировании советской авиационной, ракетной и космической техники, – это материалы, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ).

Производство полимерных композиционных материалов (ПКМ) осуществляется для многих рынков – аэрокосмического, автомобильного, морского, потребительского, ветровой энергии и т. д. Применение ПКМ определяется требованиями к характеристикам деталей, максимально допустимыми значениями затрат, нормативными требованиями и специфическими запросами клиентов [1–3]. Например, в коммерческом авиакосмическом производстве материалы, технологические и стоимостные параметры существенно отличаются от параметров применяемых композитов, технологических процессов и стоимости в судостроении. Для того чтобы материалы удовлетворяли этим требованиям, в ВИАМ разработан план стратегического развития до 2030 г., который предусматривает разработку материалов, необходимых для реализации проектов в различных направлениях авиа- и машиностроения [4]. Проведенные научно-исследовательские работы [5–16] позволяют открыть новые перспективы создания авиационных конструкций в 2025–2035 гг., а также использования разработанных материалов и технологий в различных отраслях.

Полимерные композиционные материалы удовлетворяют самым разнообразным требованиям. Различные доступные виды волокна, смолы, оснастки, обработки и отделки позволяют изготовить практически любую деталь для самого разного применения. Кроме того, высокие характеристики прочности и жесткости, долговечность и значительно меньшая масса ПКМ по сравнению с металлами свидетельствуют о более широком использовании этих материалов в настоящее время. При этом происходит и совершенствование существующих технологий, а также проводятся исследования с целью определения тех оптимальных технологических параметров, которые обеспечивают требуемое качество материалов для деталей и их производительность по объемам, необходимым современному рынку.

Таким образом, несмотря на все проблемы, которые вызваны пандемией, авариями и введенными санкциями, планируется повышение объема производства конструкций из ПКМ в авиастроении. Так, в 2021 г. данный объем оценивался в 1689,42 млн долл. США, а к 2027 г., по прогнозам, он достигнет 3098,03 млн долл. США [17].

Влияние пандемии и катастроф на производство самолетов

В настоящее время из-за пандемии, вызванной распространением коронавируса, количество рейсов авиаперевозок сократилось на 44 % [18]. COVID-19 изменил структуру расходов на производство лайнеров в авиаотрасли, что отрицательно сказалось на их спросе и, следовательно, на количестве потребляемых ПКМ. Кроме того, в 2019 г. было снижено количество выпускаемых самолетов из-за прекращения полетов Boeing 737 MAX, вызванного крушением двух лайнеров в конце 2018 г. и в начале 2019 г. Причиной крушения, в результате которого погибло более 300 человек, являлось несовершенство автоматизированной системы управления полетом, разработанной компанией Boeing специально для самолета 737 MAX.

Прекращение полетов лайнера Boeing 737 MAX оказало значительное влияние на всю цепочку поставок в аэрокосмической отрасли, что имело некоторые последствия и для производства ПКМ.

Произошла также задержка реализации проекта самолета NMA (New Midsize Airplane) компании Boeing, который представляет следующую серию самолетов, – по сравнению с уже функционирующими Boeing 787, 777X и Airbus A350. Ожидается, что

в нем будут представлены основные конструкции, изготовленные из ПКМ на основе углеродного волокна. Кроме того, планируется замена самолетов Boeing 737 и Airbus A320 на более современные: оба самолета будут включать агрегаты из углеродного волокна, что существенно повлияет на увеличение объемов производства ПКМ. Компании Boeing и Airbus ожидают, что темпы замены узкофюзеляжных самолетов составят 100 комплектов в месяц и что реализация данных программ начнется в 2028–2030 гг.

Тенденции применения полимерных композиционных материалов в 2025–2035 гг.

Планируемое количество авиалайнеров, необходимых для перевозки пассажиров, к 2034 г. составляет более 30 тыс. (рис. 1) [18].

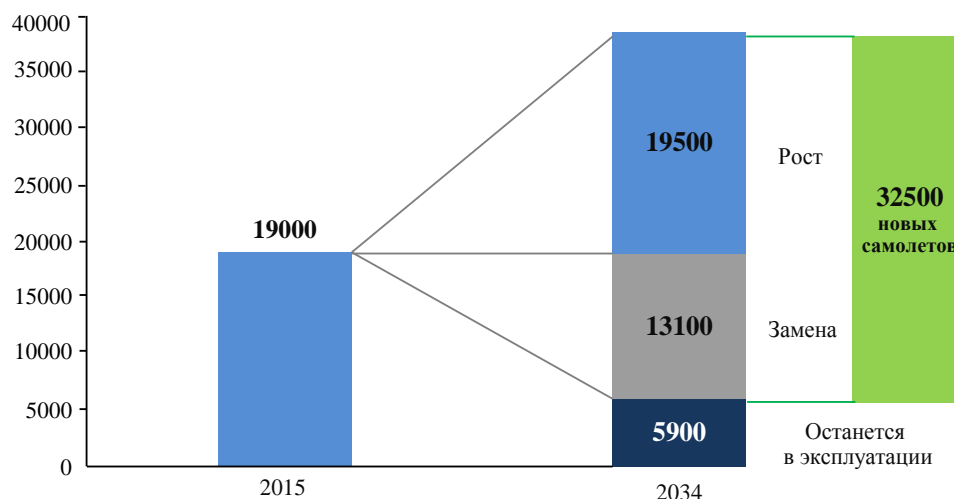


Рис. 1. Планируемая потребность в пассажирских самолетах до 2034 г. [18]

Основной вопрос заключается в том, какие ПКМ будут использовать в этих проектах и с помощью каких технологий. Для самолетов с двумя проходами (Boeing 787, 777X и Airbus A350) композиционные материалы уже применяют. Важен также тот факт, что сами авиаперевозчики предпочитают конструкции из композитов, по сравнению с традиционными алюминиевыми конструкциями, в связи с их долговечностью и простотой обслуживания. Данные преимущества позволяют широко использовать ПКМ в больших авиаконструкциях независимо от их размера или конфигурации. Таким образом, основной тенденцией применения ПКМ в самолетостроении является увеличение объемов производства лайнеров с агрегатами из композиционных материалов.

На рис. 2 представлены основные тенденции использования ПКМ.

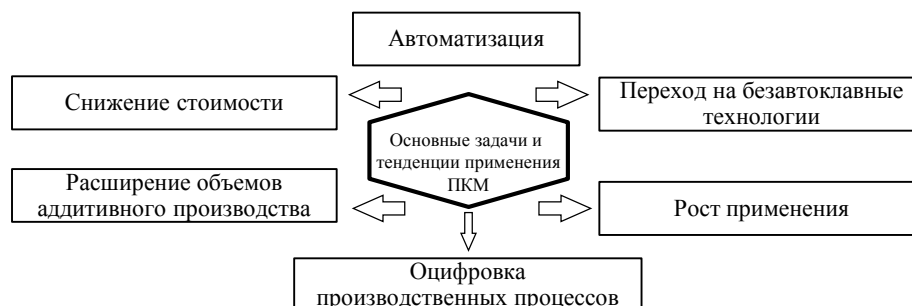


Рис. 2. Основные задачи и тенденции применения полимерных композиционных материалов

Разработка и внедрение перспективных автоматизированных технологий

С учетом того, что ПКМ на основе углеродного волокна будут использоваться в перспективных аэроструктурах, важной проблемой является возможность дальнейшей автоматизации технологических процессов. Комбинация применяемого материала и процесса (Materials and Processes – M&P) в настоящее время представляет собой отверждаемый в автоклаве препрег из углеродного волокна и эпоксидной смолы, укладываемый с помощью автоматической укладки ленты (Automated tape laying – ATL), автоматического размещения волокна (Automated fiber placement – AFP) или вручную. Таким образом, одной из важных тенденций является возможность исключить ручной труд благодаря более широкому использованию робототехники и применению автоматизированных линий. На рис. 3 представлена автоматизированная выкладка сухого углеволокна порталным роботом [19], а на рис. 4 – выкладка обшивки крыла самолета Airbus A350 [20].

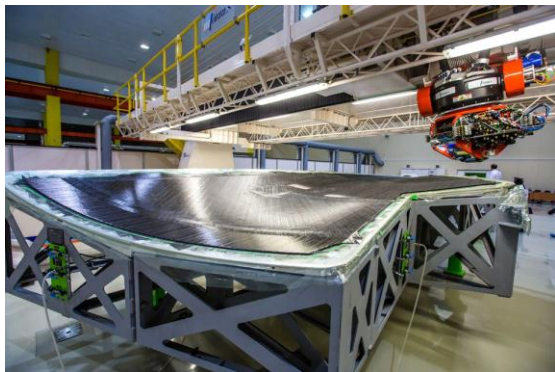


Рис. 3. Автоматизированная выкладка сухого углеродного волокна порталным роботом [19]



Рис. 4. Выкладка обшивки крыла самолета Airbus A350 [20]

Однако комбинации M&P, используемые для самолетов Boeing 787 и Airbus A350, были разработаны еще в начале 2000-х гг. Тем не менее тот факт, что данные комбинации являются квалифицированными, дает им преимущество перед новыми M&P, которые до сих пор разрабатываются и квалифицируются. Для самолета NMA в компании Boeing пока не планируется разрабатывать новые M&P, поэтому существующие технологии скорее всего будут превалировать. Кроме того, скорость создания самолета NMA, по-видимому, будет аналогична скорости сборки самолетов Boeing 787 (14 планеров в месяц) и Airbus A350 (10 планеров в месяц).

Фирма GKN Aerospace – одно из трех основных подразделений, включая GKN Automotive и GKN Powder Metallurgy, компании GKN (название которой происходит от инициалов трех ключевых фигур в ее истории – Джона Геста, Артура Кина и Джозефа Генри Неттлфолда – в области черной металлургии во время промышленной революции), обслуживающих ведущих мировых производителей самолетов и авиационных двигателей по трем направлениям деятельности: гражданские планеры, планеры оборонного назначения и системы двигателей. Данная компания считает, что ее технология изготовления крыла значительно повысит производительность процесса производства и что использование ПКМ может привести к экономии массы больших коммерческих самолетов до 20 % [18].

Фирма GKN Aerospace уже использовала свой опыт применения передовых композитных технологий не только в производстве задних кромок крыла, но и для ускорения разработки новых технологий автоматизации процессов изготовления его основных конструкций.

Компания также производит компоненты крыла из ПКМ для самолетов Airbus, включая фиксированную заднюю кромку для лайнера A380 и передние кромки крыла для лайнеров A380, A330 и A400M. Для самолета A350 XWB компания GKN Aerospace разработала и поставляет 27-метровый задний лонжерон крыла, а также внутренние и внешние закрылки (включая обшивку, лонжероны, нервюры и передние кромки).

Цель программы Wing of Tomorrow – разработать высокопроизводительный процесс производства конструкции крыла для коммерческого самолета, включающий усовершенствованную автоматизацию, использование меньшего количества деталей, лучшую их интеграцию, меньшую продолжительность цикла производства и более быстрое проведение неразрушающего контроля (Nondestructive Testing Inspection – NDI) и сборки деталей.

На рис. 5 представлена оснастка из углепластика для изготовления обшивки крыла. Благодаря интеллектуальной системе управления она осуществляет нагрев заготовок деталей требуемой мощности по зонам, что обеспечивает их качественное отверждение, несмотря на разнотолщинность обшивки.



Рис. 5. Оснастка из углепластика для изготовления обшивки крыла с индивидуальной системой нагрева заготовок деталей по зонам

Следует отметить, что в ВИАМ разработана серия материалов для автоматизированных процессов выкладки и намотки, которые успешно опробованы и используются в серийных производствах отрасли.

Разработка материалов и безавтоклавных технологий изготовления

Производство узкофюзеляжных самолетов компаниями Boeing и Airbus (737 и A320) в перспективе будет наиболее прибыльным в аэрокосмической отрасли. Изготовление деталей и конструкций из ПКМ для нового поколения этих самолетов (с ожидаемой скоростью производства лайнеров в количестве 100 шт. в месяц) невозможно при использовании существующей технологии автоклавного отверждения. Поэтому при разработке новых узкопроходных самолетов однозначно необходимо применять новые материалы и безавтоклавную технологию (out-of-autoclave – OOA), которые значительно сократят продолжительность цикла изготовления деталей.

Несколько разновидностей технологии OOA в ближайшее время будут широко использоваться при разработке самолетов следующего поколения. Они включают применение методов инфузии и пропитки под давлением (Resin Transfer Moulding – RTM). Компании Boeing и Airbus разрабатывают эту технологию в рамках различных программ исследований, призванных довести их до уровня технологической готовности (Technology Readiness Level – TRL), который позволит обеспечить серийное производство не позднее 2025 г. [18, 20–23].

Компания Airbus со своей стороны реализует множество решений в рамках масштабных программ с участием нескольких организаций. Наиболее примечательной является программа Wing of Tomorrow, которую возглавляют следующие компании:

GKN Aerospace (Ширли, Солихалл, Великобритания), Национальный центр композитов (NCC, Бристоль, Великобритания), Northrop Grumman (Клирфилд, Юта, Великобритания), Spirit AeroSystems (Уичито, Великобритания), Spirit AeroSystems (Уичито, Великобритания и Канзас, США), Solvay Composite Materials (Джоржия, США). Данная программа предполагает использование RTM для изготовления обшивки крыла, лонжеронов, нервюры и кессона крыла.

Процесс изготовления крыльев методом инфузии не нов. Его уже используют для двух коммерческих узкофюзеляжных самолетов – это Airbus A220 и MC-21. Самолет A220 разработан фирмой Bombardier как CSeries, а затем продан компании Airbus в 2018 г. Его крылья все еще производит фирма Bombardier на своем заводе в Белфасте (Северная Ирландия). Самолет MC-21 производится Объединенной авиастроительной корпорацией (Россия). Первые крылья были изготовлены компанией «АэроКомпозит» с применением импортных компонентов. Однако в настоящее время из-за санкций, которые наложены на Российскую Федерацию, используемое связующее больше не поставляется. В связи с этим российские ученые разработали отечественные аналоги материалов для производства крыльев методом инфузии и успешно изготовили их с использованием безавтоклавной технологии [17, 24, 25].

Изготовление для самолета MC-21 крыльев из углепластика безавтоклавным способом доказывает, что инфузия возможна для коммерческих самолетов, однако скорость производства деталей для таких лайнеров остается пока относительно низкой, поэтому необходима разработка новой технологии с высокопроизводительным уровнем изготовления. На рис. 6 представлено фото оснастки с обшивкой крыла для отверждения в термопечи.



Рис. 6. Формование в термопечи обшивки крыла самолета MC-21 [19]

Для реализации процессов инфузии в ВИАМ разработана серия связующих, позволяющих применять безавтоклавные технологии, которые успешно опробованы и продолжают совершенствоваться с целью удовлетворения потребностей заказчиков.

Перспективы применения термопластов

Применение термопластичных композиционных материалов (ТКМ) в конструкциях фюзеляжа самолетов является перспективным. Это важно, потому что в течение многих лет оставался нерешенным вопрос, имеет ли смысл использовать ТКМ в фюзеляже узкофюзеляжных самолетов. Вопрос возникал в первую очередь потому, что толщина обшивки фюзеляжа на узкофюзеляжных самолетах меньше, чем на двухпроходных широкофюзеляжных. Эта более тонкая оболочка, при изготовлении которой используются современные ТКМ и технологии, делает конструкции

достаточно дорогими и тяжелыми. Поэтому в настоящее время основная задача состоит в том, чтобы разработать такую комбинацию композитов и технологий для фюзеляжа, которая обеспечит относительно тонкую и доступную по стоимости толщину обшивки.

В Европе данная задача решается в рамках проекта «Демонстрация многофункционального фюзеляжа нового поколения Clean Sky 2» (MFFD). Как следует из названия, программа направлена на усиление интеграции фюзеляжа и элементов кабины с минимальным использованием крепежных элементов. Применение термопластов позволит сделать это путем сварки. Одной из самых активных компаний, участвующих в разработке термопластичных аэроструктур, является компания GKN/Fokker (Хоогевен, Нидерланды), которая на выставке JEC World 2019 в Париже представила термопластичную панель фюзеляжа, изготовленную для самолета Gulfstream. Фюзеляж имеет взаимосвязанную сварную решетчатую структуру, которая демонстрирует многофункциональность, предусмотренную MFFD Clean Sky (рис. 7). Конструкция Fokker – это только один из нескольких шагов, которые предстоит сделать на пути к развитию этой технологии для потенциального использования в узкофюзеляжных коммерческих самолетах.

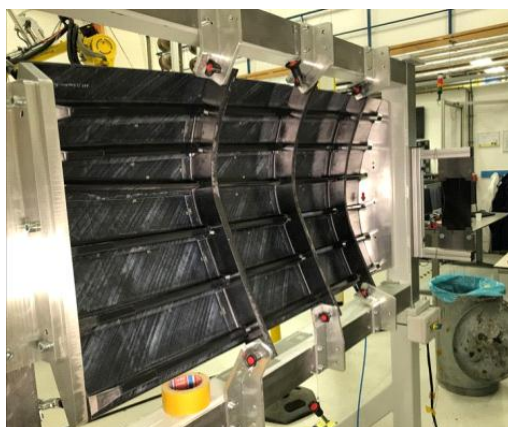


Рис. 7. Термопластичная панель фюзеляжа [24]

Помимо фюзеляжа, термопластичные материалы уже широко используются в самолетах. В частности, компания Boeing предпринимает согласованные решения по преобразованию более мелких конструктивных элементов (кронштейнов, зажимов, крепежных элементов) – происходит переход от использования терморепактивных композитов к термопластичным. Специалисты по термопластам из компании ATC Manufacturing (Пост-Фоллс, Айдахо, США), которая специализируется на непрерывном прессовании, возглавляют эту конверсию.

Наблюдается значительная активность и в области производства сырьевых материалов для термопластов. Производитель смол – компания Victrex Plc (Кливленс, Великобритания) – разработала материал PAEK AE 250, линию производства лент и ламинатов из углеродного волокна, предварительно пропитанных легкоплавкой полиарилэфиркетоновой смолой (PAEK). Данная смола обеспечивает температуру плавления всего 305 °C – по сравнению с температурой 350 °C для полиэфирэфиркетона (PEEK), который является основой термопластичных аэрокомпозитов. Это важно, поскольку пониженная температура расплава ускоряет цикл нагрева/охлаждения и способствует сокращению продолжительности цикла. Это также позволяет наложить на ламинат PAEK функциональные элементы PEEK (ребра, крепежные зажимы).

Цифровизация и применение искусственного интеллекта

В 2016 г. появился термин «Индустрия 4.0», обозначающий начало четвертой промышленной революции, которая характеризуется изменением не только производства, но всего уклада жизни человечества. Роботизация, появление «умных» заводов и искусственного интеллекта становятся частью нашей обычной жизни. Все это обеспечивает высокую производительность труда, повышенный уровень автоматизации проектирования, изготовления, отслеживание жизненного цикла и утилизацию после окончания эксплуатации [25]. На рис. 8 показана схема применения искусственного интеллекта при проектировании, изготовлении и эксплуатации конструкции из ПКМ и ее двойника.



Рис. 8. «Индустрия 4.0» и разработка конструкций из полимерных композиционных материалов [25]

При этом использование цифровых двойников сокращает затраты и время на исследования и разработку новых изделий.

Тенденции применения полимерных композиционных материалов в 2025–2035 гг.

При изготовлении композитных конструкций современных самолетов применяются такие автоматизированные технологии, как выкладка препрега, намотка, инфузия и пропитка под давлением. В перспективе намечается расширение объема использования аддитивных технологий, что позволит получать детали сложной формы, в том числе с внутренними каналами или пустотами. С помощью традиционных технологий изготовление таких деталей было невозможно. В настоящее время по аддитивным технологиям производят в основном конструкции из термопластичных материалов небольших габаритов. В перспективе – изготовление крупногабаритных деталей на основе различных связующих.

Другим очень важным вопросом является снижение стоимости конструкций и разработка технологий вторичного использования отслуживших свой срок деталей. Как показывает практика, снижение стоимости возможно при увеличении объемов и разработке новых, более экономичных способов производства. Несмотря на то что срок эксплуатации конструкций из ПКМ превышает 50 лет и требует, как правило, меньших эксплуатационных затрат, все же полимерные композиционные материалы применяются там, где снижение массы изделий позволяет перекрыть затраты на дорогостоящие компоненты и трудоемкость изготовления. Однако в настоящее время стоимость изделий из ПКМ остается высокой и превышает стоимость изделий, выполненных из таких традиционных материалов, как металлы. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разрабатываются перспективные материалы, в том числе

используемые при температурах до 400 °С, и новые технологии с применением безавтоклавных процессов и трехмерноармирующих преформ, что позволяет расширить области использования и в перспективе снизить затраты при изготовлении.

Следует отметить, что работы выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

В перспективе планируется широкое внедрение ПКМ как в конструкциях летательных аппаратов, так и в других отраслях промышленности.

Изготовление конструкций из ПКМ будет сопровождаться усиленным внедрением автоматизированных процессов, что потребует создания отечественных линий, роботов и другого оборудования, а также организации подготовки специалистов, которые будут проектировать (в том числе оснастку), изготавливать и эксплуатировать данное оборудование.

Дальнейшее внедрение ПКМ будет сопровождаться переходом на использование безавтоклавных технологий, что позволит обеспечить массовое изготовление конструкций, в том числе крупногабаритных.

Одно из условий быстрого и уверенного использования ПКМ в конструкциях – это внедрение математического моделирования на этапах проектирования, изготовления и жизненного цикла изделий из композиционных материалов, а также использование искусственного интеллекта.

Ожидается расширение применения как термопластичных материалов, так и комбинаций термопластичных и термореактивных матриц, а также металлических элементов конструкций совместно с композитами.

Необходимым условием дальнейшего внедрения ПКМ в различные отрасли является снижение их стоимости, обеспечивающей экономическую эффективность применения композитов на всех этапах эксплуатации, последующей утилизации или вторичного использования.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
6. Решение Всероссийской научно-технической конференции «Функциональные и полимерные материалы для авиационного остекления» (г. Москва, 10 дек. 2021 г.) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 13. URL: <https://viam-works.ru> (дата обращения: 10.06.2022).
7. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.

8. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
9. 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.
10. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
11. 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: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
12. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Постнова М.В., Баранников А.А. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 4–3. С. 344–350.
13. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
14. Гончаров В.А., Раскутин А.Е. Компьютерное моделирование процесса инфузии при изготовлении композитного арочного элемента // Труды ВИАМ. 2015. № 7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
15. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ. 2015. № 3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
16. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Громова А.А., Гусев Ю.А. Влияние эксплуатационных факторов на основные физико-механические свойства изделий из стеклопластика ВПС-31 // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.
17. Aero-Engine Composites Market Research Report by Component, Application, Region – Global Forecast to 2027 – Cumulative Impact of COVID-19. 2022. 255 p. // ReportLinker. URL: <https://www.reportlinker.com/p06080221/Aeroengine-Composites-Market-Research-Report-by-Component-by-Application-by-Region-Global-Forecast-to-Cumulative-Impact-of-COVID-19.html> (дата обращения: 26.01.2022).
18. Composites 2020: A Multitude of Markets – CompositesWorld. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-2020-a-multitude-of-markets> (дата обращения: 26.01.2022).
19. МС-21 – лайнер с «черным» крылом // Авиация России. URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (дата обращения: 16.02.2022).
20. Richardson M. MTorres made AFP sole supplier for A350 XWB wing skins // Aerospace Manufacturing. URL: <https://www.aero-mag.com/mtorres-made-afp-sole-supplier-for-a350-xwb-wing-skins> (дата обращения: 26.10.2022).
21. Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 126. P. 55–83.
22. Williams C., Summerscales J., Grove S. Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): a review // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 1996. Vol. 27 (7). P. 517–524.

23. Тренды и драйверы в композитах // Umatex Росатом. URL: <https://umatex.com/news/trendy-i-drayvery-v-kompozitakh/> (дата обращения: 26.05.2022).
24. Mason K. Thermoplastic-primary-aerostructures-take-another-step-forward. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-primary-aerostructures-take-another-step-forward> (дата обращения: 26.01.2022).
25. Что такое индустрия 4.0 и что нужно о ней знать // РБК. Тренды. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7> (дата обращения: 26.05.2022).

References

1. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
4. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
6. The solution of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Functional and Polymer materials for aviation glazing» (Moscow, Dec. 10, 2021). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 13. Available at: <https://viam-works.ru> (accessed: June 10, 2022).
7. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 18, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
8. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 16, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
9. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), no. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
10. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Yazvenko L.N., Composite materials for non-autoclave technology (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (63), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
11. 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://journal.viam.ru> (accessed: February 16, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
12. Veshkin E.A., Postnov V.I., Postnova M.V., Barannikov A.A. Experience of application vacuum infusion technologies in production of designs from PCM. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4–3, pp. 344–350.
13. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
14. Goncharov V.A., Raskutin A.E. Computer modeling of the infusion process in the manufacture of composite arched element. *Trudy VIAM*, 2015, no. 7, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 20, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.

15. Gusev Yu.A., Borshhev A.V., Khrulkov A.V. Features of prepregs intended for automated laying by ATL and AFP technologies. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
16. Popov Yu.O., Kolokoltseva T.V., Gromova A.A., Gusev Yu.A. Influence of operational factors on the main physical and mechanical properties of a fiberglass product VPS-31. *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.
17. Aero-Engine Composites Market Research Report by Component, Application, Region – Global Forecast to 2027 – Cumulative Impact of COVID-19. *Report Linker*. Available at: <https://www.reportlinker.com/p06080221/Aeroengine-Composites-Market-Research-Report-by-Component-by-Application-by-Region-Global-Forecast-to-Cumulative-Impact-of-COVID-19.html> (accessed: October 26, 2022).
18. A Multitude of Markets. *Composites World*. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/a-multitude-of-markets> (accessed: January 26, 2022).
19. MS-21 is an airliner with a "black" wing. *Aviation of Russia*. Available at: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (accessed: February 16, 2022).
20. Richardson M. *MTorres made AFP sole supplier for A350 XWB wing skins*. Available at: <https://www.aero-mag.com/mtorres-made-afp-sole-supplier-for-a350-xwb-wing-skins> (accessed: October 26, 2022).
21. Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, pp. 55–83.
22. Williams C., Summerscales J., Grove S. Resin Infusion under Flexible Tooling (RIFT): a review. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1996, vol. 27 (7), pp. 517–524.
23. *Trends and drivers in composites*. Available at: <https://umatex.com/news/trendy-i-drayvery-v-kompozitakh> (accessed: May 26, 2022).
24. Mason K. Thermoplastic primary aerostructures take another step forward. *CompositesWorld*. Available at: <https://www.compositesworld.com/articles/thermoplastic-primary-aerostructures-take-another-step-forward> (accessed: January 26, 2022).
25. *What is Industry 4.0 and what you need to know about it*. Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/5e740c5b9a79470c22dd13e7> (accessed: May 26, 2022).

Информация об авторах

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Донецкий Кирилл Игоревич, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хрульков Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill I. Donetskiiy, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander V. Khrulkov, Leading Engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.07.2022.
The article was submitted 20.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 22.07.2022.