

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СЕМИПРЕГОВ

Р.Ю. Караваев¹, Н.А. Городилова¹, К.И. Донецкий¹

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

Аннотация. Рассмотрены особенности изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе семипрегов, перерабатываемых вакуумным формованием. Установлены основные подходы и требования к связующим, наполнителям и процессам, проходящим при формовании. Обращено внимание на исследования, выполненные зарубежными изготовителями семипрегов. Представлен закон Дарси как основной постулат при проведении процессов пропитки наполнителей связующим. Приведены свойства ПКМ на основе семипрегов из равнопрочной и однонаправленной тканей и эпоксидного расплавленного связующего разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, семипрег, связующее, вакуумное формование, отверждение, пористость, закон Дарси

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.

Scientific article

PRODUCTION OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON SEMIPREGS

R.Yu. Karavaev¹, N.A. Gorodilova¹, K.I. Donetskii¹

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 features of manufacturing polymer composite materials (PCM) based on semipregs processed by vacuum molding are considered. The main approaches and requirements for binders, fillers and processes taking place during molding are established. Attention is drawn to the research carried out by foreign manufacturers of semipregs. Darcy's law is presented as the main postulate when carrying out the processes of impregnation of fillers with a binder. The properties of PCM based on semipregs made of equal-strength and unidirectional fabrics and epoxy melt binder developed by SIC «Kurchatov Institute» – VIAM are given.

Keywords: polymer composite materials, semipreg, resin, vacuum forming, curing, porosity, Darcy's law

For citation: Karavaev R.Yu., Gorodilova N.A., Donetskii K.I. Production of polymer composite materials based on semipregs. *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-64-74.

Введение

Формование изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) по технологиям безавтоклавного формования в авиации известно еще со времен Великой Отечественной войны, когда на советских авиазаводах формовали обшивки фюзеляжа

из древесного шпона для истребителей Ил-2, Як-3, ЛаГГ и др. [1]. С появлением в 1940-х гг. стеклопластиков их формование продолжили тем же способом с помощью герметичного технологического пакета, в который помещали будущее изделие и удаляли воздух вакуумом [2]. Это продолжалось в самолетостроении и в 1970-х гг. при первых применениях углепластиков, которые использовали в основном для изготовления усиливающих элементов металлических конструкций, а чаще всего в качестве обшивок трехслойных сотовых элементов, механизации крыла и оперения [3]. Ввиду того, что значения температурного коэффициента линейного расширения углепластиков и металлов разные, от производства усиливающих элементов пришлось отказаться. Кроме того, изготовление путем вакуумного формования как монолитных, так и трехслойных сотовых конструкций приводило к получению углепластиков с высокой объемной долей пор (5–10 %), сильно влияющей на межслойную прочность при сдвиге и сжатии [4, 5]. Причиной образования пористости является недостаточное для получения качественного материала давление атмосферы. Поэтому для изготовления изделий с объемной долей пор не более 1–2 % в промышленности стали использовать формование в автоклавах, позволяющих создавать давление до 0,6–0,7 МПа и более. В результате о влиянии пористости композитов на свойства забыли и автоклавное формование стало основным способом на долгие годы. Главным материалом при данной технологии являются препреги – ткани или однонаправленные ленты, полностью пропитанные связующим.

Расширение объемов применения углепластиков до 50 % в авиационной промышленности (в том числе на самолетах Boeing 787 и Airbus A350), а также в изделиях оборонной и автомобильной промышленности, судостроении и аэрокосмической отрасли потребовало поиска новых, альтернативных автоклавному формованию, и менее затратных методов изготовления, позволяющих получать материалы с такими пористостью и механическими свойствами, которые сопоставимы с показателями материалов, полученных автоклавным формованием [6–9]. Удалить воздух в препреге с помощью вакуумирования не удавалось из-за недостаточного давления и высокой вязкости связующего.

Первые препреги для вакуумного формования имели три основных недостатка: малую жизнеспособность, достаточно высокую пористость (не менее 5 %) и относительно низкие механические характеристики ПКМ. Рассматривая структуру препрега для автоклавного формования с двухсторонним нанесением связующего, исследователи пришли к пониманию, что воздух при формовании остается внутри препрега, поэтому было принято решение превратить препрег в «дышащую» структуру, из которой воздух будет уходить по каналам, образуемым сухими волокнами ткани.

Для достижения поставленной цели предложены и разработаны соответствующие расплавные связующие и технологии их нанесения на армирующие наполнители для получения семипрегов – материалов, состоящих из пленки связующего и сухого армирующего наполнителя, имеющего каналы в волокнистой структуре непропитанной части наполнителя для удаления воздуха перед формованием.

Результаты проведенных исследований показали, что возможно получать ПКМ путем вакуумного формования со значением пористости <1 % [10–15]. В данных публикациях представлено описание материалов, полученных из семипрегов, свойства которых удовлетворяют требованиям, предъявляемым к свойствам материалов для изготовления слабо- и средненагруженных конструкций. Известно о большом количестве исследований семипрегов, которые позволили создать новое поколение материалов, отвечающих требованиям потребителей: увеличение их жизнеспособности в процессе сборки пакета; длительное сохранение неизменной вязкости связующих при комнатной или повышенной температурах; получение прочностных характеристик, сопоставимых

со свойствами ПКМ, изготовленных автоклавным формованием, оптимальных значений проницаемости и низких значений объемной доли пор ПКМ [16–18].

Материалы и методы

Свойства компонентов, составляющих структуру композита (волокно, связующее и поры), взаимно влияют на процессы, происходящие при формовании. В целом, однако, свойства волокна и структура волокнистого слоя являются достаточно стандартизованными, тогда как свойства связующих в составе семипрегов находятся на стадии развития и становления. Зоны в семипрегах, свободные от связующего, при вакуумном формовании должны оставаться такими долгое время – вплоть до начала нагревания собранного пакета после удаления воздуха и влаги. Это накладывает определенные требования к связующему: на первой стадии (удаление воздуха при комнатной температуре) связующее должно оставаться вязким и не пропитывать семипрег; вторая стадия заключается в нагревании связующего для снижения вязкости и пропитке сухих зон под действием давления атмосферы на связующее, при этом вязкость должна быть достаточной, чтобы пропитать полностью все пустое пространство.

Принципиальная схема изготовления семипрегов представлена на рис. 1.

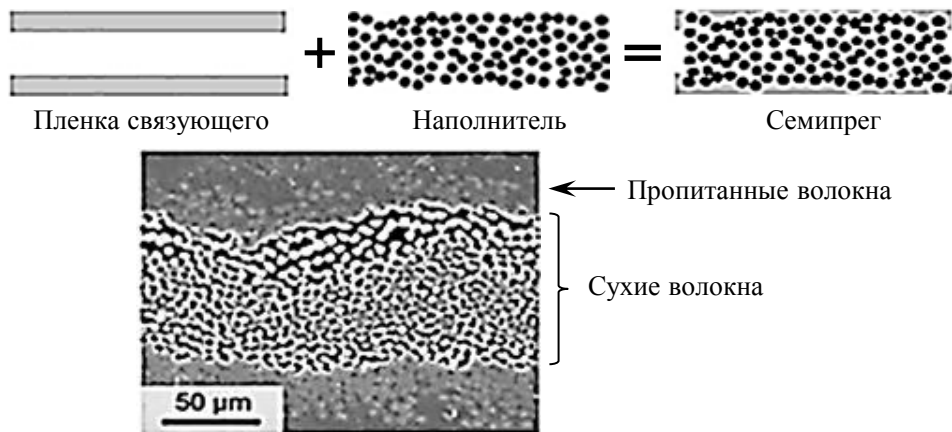


Рис. 1. Схема изготовления семипрегов

Поскольку процесс вакуумирования при изготовлении разногабаритных изделий длится иногда несколько часов или дней, состояние вязкости связующего имеет важнейшее значение для предотвращения преждевременного заполнения им воздухопроводящих путей. Кроме того, значение вязкости связующего должно быть таким, чтобы воздух, находящийся в нем, мог выйти в атмосферу, преодолевая сопротивление связующего [13]. Необходимо понимать влияние свойств используемых наполнителей, связующих и параметров процессов, происходящих при вакуумном формовании семипрегов, для выработки соответствующих условий изготовления материалов.

В семипрегах следует образовать пути выхода воздуха из сухой части до начала гелеобразования связующего и не допустить при этом его течения в процессе вакуумирования. Удаление воздуха проводится длительное время при создании вакуумного давления в технологическом пакете не менее $-0,090$ МПа.

При этом очень важно, чтобы герметичность вакуумного пакета не нарушалась, поскольку его качество должно быть высоким на протяжении всего процесса. Удаление воздуха проводится в основном в направлении укладки слоев, т. е. вдоль. В зонах, заполненных связующим, образуются сухие участки ткани, окруженные им, из которых

также необходимо удалить воздух, а при нагреве заполнить эти пустоты связующим. Отличительная особенность семипрегов для вакуумного формования заключается в следующем: удаление воздуха необходимо проводить в течение длительного времени при максимальном уплотнении материала до получения минимального остатка воздушных включений. Таким образом, для успешного формования семипрегов следует внимательно изучить их свойства, условия переработки и выбрать параметры процесса, принимая во внимание, что при отсутствии высокого давления могут возникать отклонения от идеальных условий. Кроме того, необходим тщательный контроль реологии связующего.

Процесс совмещения связующего с сухой частью семипрега после укладки слоев на оснастку связан с поведением трех основных составляющих (волокна, связующего и воздуха (паровоздушной смеси) как в сухой части семипрега, так и в связующем в процессе формования), а также с их конечным состоянием после отверждения. Для семипрегов к этим явлениям относятся: удаление воздуха, уплотнение пакета семипрега, нагрев и пропитка связующим наполнителя. После формования необходимо определить объемную долю пор полученного пластика. Каждый слой семипрега состоит из сухой непропитанной части ткани или волокнистых жгутов и другой части, пропитанной связующим. Пропитанная связующим часть содержит зоны волокон, окруженные им, а внутри жгутов волокон находится воздух в виде микропустот. Удаление воздуха с помощью вакуума, приводящее к уменьшению микро- и макропустот и уплотнению слоев, выполняется прежде всего из мешка, где находится сборка, при комнатной температуре; жгуты остаются сухими. После процесса дегазации проводится подъем температуры, связующее размягчается и осуществляется пропитка сухой части наполнителя до получения пластика (в идеале) без пустот.

При вакуумном удалении значительное количество захваченного воздуха удаляется из собранного пакета, но объемная доля пор в семипреге снижается лишь немного, главным образом из-за уплотнения волокнистого слоя, поскольку давление воздуха внутри сухих жгутов и в зазорах ткани уменьшается. В конце процесса вакуумирования при комнатной температуре в семипрегах остается много пустот, но давление воздуха в них очень низкое, поэтому, когда происходит нагревание, вязкость связующего снижается и связующее легко заполняет пустые пространства, что обеспечивает получение пластика с небольшой объемной долей пор.

В основе исследования процессов пропитки наполнителей связующим находится закон Дарси, согласно которому расход потока жидкости прямо пропорционален коэффициенту проницаемости, площади фильтрации, перепаду давления жидкости и обратно пропорционален вязкости связующего и длине фильтрации наполнителя, что представлено в следующем выражении [19]:

$$Q = \frac{K \cdot F \cdot \Delta P}{\mu \cdot \Delta L},$$

где Q – расход потока жидкости, м³/с; K – коэффициент проницаемости, м/с; F – площадь фильтрации, м²; ΔP – перепад давления жидкости, Па; μ – вязкость жидкости, с·Па; ΔL – длина участка фильтрационного потока, м.

С помощью проницаемости оценивают устойчивость пористой среды к прохождению через нее связующего. Данный параметр зависит от геометрических характеристик. Он не измеряется напрямую – его рассчитывают на основании предполагаемой модели потока и измеренных данных, связанных с потоком (например, расход, давление) [20]. Проницаемость определяется величиной градиента давления и измерением результирующего жидкого потока.

Волокнистые структуры обладают относительно высокой пористостью с повышенной удельной поверхностью и относительно низким сопротивлением потоку. Однако в случае семипрегов пористая структура пропитана связующим частично и в течение цикла отверждения изменяется по мере проникновения в нее связующего. В свою очередь параметр проницаемости влияет на пористость материала.

Сначала связующее заполняет более крупные межжгутовые пространства в ткани, а затем медленно – межволоконные зазоры в самих жгутах, завершая пропитку. Скорость заполнения двух разных пустот различна. На длительность заполнения связующим большое влияние оказывает температура, с увеличением которой скорость пропитки возрастает пропорционально изменению вязкости связующего.

Например, в работах [21, 22] представлена математическая модель, а также спрогнозированы значения скорости реакции и вязкости для связующего Cusom Cytec 5320-1 с использованием экспериментальных данных, полученных с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии и динамического и механического анализа.

При исследовании данного связующего установлено, что температура стеклования является надежным показателем для отслеживания жизнеспособности препрега при хранении. Аналогичные результаты получены в работе [23], где авторы, изучая кинетику изменения скорости отверждения и вязкости связующего Cusom Cytec 5320-1 от 0 до 49 дней, подтвердили существенные изменения в значениях данных параметров. Кроме того, в этой работе разработана корреляция между степенью отверждения и вязкостью рассматриваемого связующего.

В работе [24] исследовали связующие МТМ45-1 и Cusom Cytec 5320 (рис. 2) для семипрегов с помощью двухступенчатого цикла отверждения. Результаты исследований использовали для разработки аналитической модели, которая эффективно предсказывает указанные ранее свойства для любой температуры в зависимости от продолжительности цикла. Первый этап представляет собой низкотемпературное отверждение связующего для создания прочности, достаточной для перехода ко второму этапу отверждения. Изменение степени отверждения и значений динамической вязкости измеряли с использованием соответственно дифференциальной сканирующей калориметрии и реологии при различных тепловых условиях. Полуэмпирические модели кинетики отверждения и вязкости соответствовали измеренным данным.

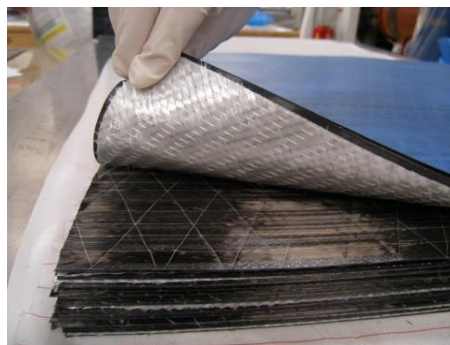


Рис. 2. Препрег на основе связующего Cusom Cytec 5320

Данные связующие сравнили также со связующим HexPly 8552 фирмы Hexcel, используемым для изготовления автоклавных препрегов. Как и следовало ожидать, оба семипрега были более реакционноспособны, чем автоклавный, в диапазоне температур от 80 до 140 °С.

При исследовании связующего Cusom Cytec 5320 отмечено, что время жизнеспособности при хранении влияет на кинетику отверждения и липкость препрега [25],

значение которой остается относительно неизменным в течение первых 14 дней, а затем быстро уменьшается до 0. Со временем снижается и теплота реакции отверждения.

В работах [26, 27] проведены аналогичные исследования путем пропитки и отверждения односторонних семипрегов МТМ45-1/5HS и семипрегов ST94-RS200T, ST94-RC303T фирмы Gurit при различных давлениях и температурах. Ткань 200T имеет поверхностную плотность 200 г/м^2 , количество волокон в жгуте составляет 3000 шт., ширина (диаметр) жгута – приблизительно 2 мм, а ткань 303T имеет поверхностную плотность 303 г/м^2 и соткана из жгутов с количеством волокон 12000 шт. и шириной ~6 мм.

Наблюдение за характером движения связующего по ткани осуществляли с помощью камеры, расположенной под прозрачным столом и фиксирующей положение связующего во времени. Картина сухих и заполненных зон ткани указывает на характер двойного (последовательного) движения связующего по крупным и мелким порам. Замечено также, что в жгутах связующее двигалось как в осевом, так и в поперечном направлениях.

Авторами работ [26, 27] разработана модель, которая описывает распределение нагрузки между связующим и волокнами. Она проверена экспериментально и показывает хорошую сходимость. Сначала эксперимент проводили в изотермических условиях, меняя только давление на связующее (от 0,002 до 0,054 МПа), которое меньше давления 0,101 МПа, прикладываемого при формовании атмосферой. Затем эксперимент проводили при давлении 0,015 МПа при температурах 55, 60 и 85 °С. С увеличением температуры скорость пропитки возрастает пропорционально изменению вязкости связующего. Установлено, что скорость заполнения связующим ткани 303T с широкими жгутами диаметром 6 мм на порядок медленнее, чем у ткани 200T. Этот результат наглядно показывает, что время заполнения измеряется квадратом длины заполняемой области, несмотря на то, что значения проницаемости этих двух тканей приблизительно одинаковые. Ширина жгута ткани 303T в 3 раза больше ширины жгута ткани 200T, поэтому для заполнения препрега ST94-RC303T потребуется времени в 9 раз больше. Результаты наблюдений за процессом пропитки ткани, расположенной на прозрачном столе, свидетельствуют, что связующее сначала проникает в пустые межжгутые зазоры, а затем, после их заполнения, – между волокнами жгута до полной пропитки ткани.

Изображения, полученные из каждого теста, обработали для определения относительной площади, заполненной связующим. Заполненная площадь и время, в которое сделано каждое изображение, записывали в виде кривых (рис. 3).

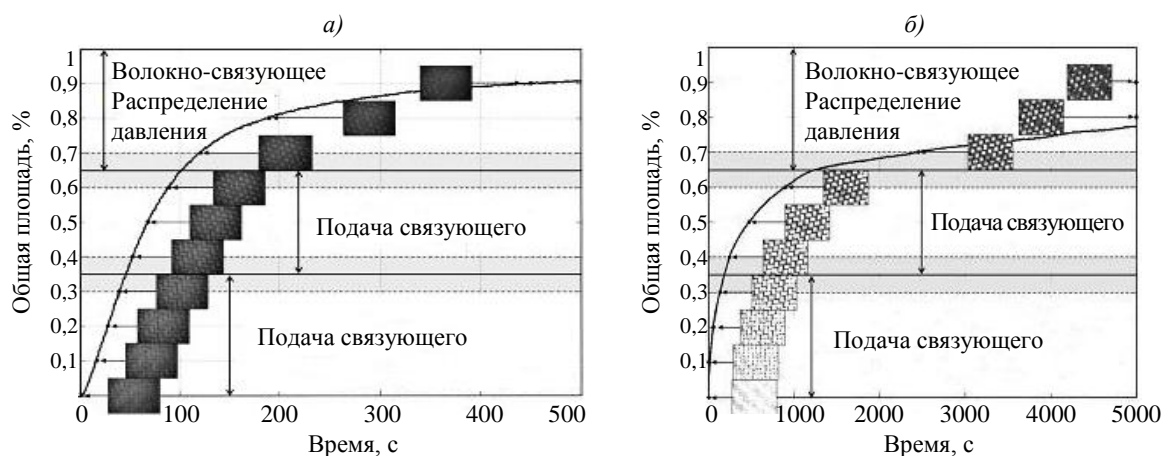


Рис. 3. Изображения, иллюстрирующие заполнение связующим во времени семипрегов ST94-RC200T (а) и ST94-RC303T (б)

На рис. 3 можно заметить, что заполнение связующим разделено на три области, а именно:

- заполнение пространства между жгутами связующим при ~35 % общей занимаемой площади (межжгутовое заполнение);
- второе изменение наклона кривых менее очевидно, но предполагается, что заполнено ~65 % занимаемой площади (межволоконное заполнение);
- третья область характеризуется длительным набором связующего волокнами, так как их основные области (межжгутовые и межволоконные) уже практически заполнены и происходит замедление пропитки.

Результаты и обсуждение

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводятся разработки по созданию семипрегов, полученных на основе равнопрочной и однонаправленной тканей с эпоксидным расплавленным связующим, производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В качестве основы для производства семипрегов используют тканые или жгутовые наполнители, которые дублируются с пленкой связующего. На рис. 4 представлены стадии изготовления семипрега.

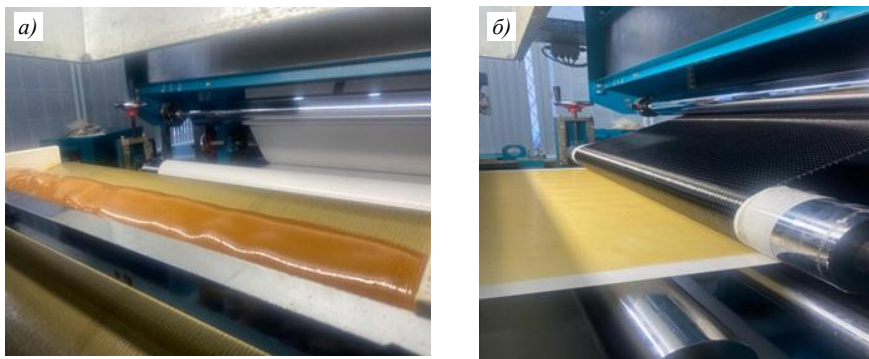


Рис. 4. Прогрев связующего между валами коутера перед пропиткой углеродного наполнителя (а) и процесс совмещения углеродного наполнителя с изготовленной пленкой связующего (б)

Определены характеристики образцов углепластиков на основе равнопрочной и однонаправленной тканей. Результаты приведены в таблице.

Свойства углепластика из семипрега на основе однонаправленной и равнопрочной тканей

Свойства	Значения свойств для углепластика на основе	
	однонаправленной ткани	равнопрочной ткани
Содержание связующего в семипреге, % (по массе)	36±4	36±4
Толщина монослоя, мм	0,20±0,02	0,20±0,02
Прочность, МПа:		
при растяжении	2120	772
при изгибе	1430	940
Температура стеклования, °С	174	174
Пористость, %	0,35	0,05

Таким образом, можно сделать вывод, что семипреги, перерабатываемые безвакуумным формованием, имеют высокие физико-механические свойства наряду с низкой пористостью.

Представляется важным знание закономерностей процесса изготовления ПКМ на основе вакуумных технологий формования в целях получения материала со свойствами, которые от него ожидают.

Заключения

В настоящее время семипреги применяют в различных отраслях, таких как автомобиле- и судостроение, медицина, а также при производстве композиционных сэндвич-панелей и спортивного оборудования.

Семипреги также выпускают в промышленном масштабе и используют для производства изделий авиационного и космического назначения. Для получения высококачественного пластика широко применяют моделирование процессов пропитки в семипрегах с использованием закона Дарси, значений вязкости связующих, поперечной проницаемости и давления. Расчетные модели подтверждены данными экспериментальных исследований.

К основным параметрам вакуумного формования ПКМ следует отнести выбор наполнителей и связующих для получения семипрегов, определение значений проницаемости наполнителей и семипрегов, изменение вязкости связующих во времени, а также процессов подготовки к формованию и отверждению связующего: длительное удаление паровоздушной смеси из наполнителей и семипрегов при комнатной температуре, соблюдение выбранных режимов нагрева при формовании и отверждении связующего, контроль свойств материала полученных изделий и объемной доли пористости.

Отверждение ПКМ с использованием только вакуумного давления позволяет композитам с полимерной матрицей достичь поставленных целей по стоимости, обеспечивая при этом производительность, сравнимую с производительностью при автоклавном производстве. Преимуществами изготовления семипрегов являются: снижение высоких капитальных вложений, связанных с покупкой новых автоклавов, а также возможность производства крупногабаритных изделий.

Таким образом, использование ПКМ на основе разработанных материалов позволит:

- уменьшить массу деталей при замене металлических сплавов на композиционные материалы;
- снизить себестоимость изделий, полученных вакуумным способом формования, относительно изделий, изготовленных с помощью более энергозатратной и дорогостоящей технологии – автоклавного формования;
- повысить технологичность сборки вакуумного пакета за счет обеспечения необходимой липкости и сократить продолжительность вакуумирования заготовки.

Таким образом, развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс изготовлению новых образцов техники для различного применения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
2. Теренин Б.П. Технологические особенности изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика. Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. М.: Оборонгиз, 1960. 168 с.
3. Гуняев Г.М. Конструирование высокомодульных полимерных композитов. М.: Машиностроение, 1977. 159 с.
4. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
5. Браутман Л. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978. 153 с.

6. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Грачева А.Д. Углепластик на основе объемно-армирующей плетеной преформы для элемента лопасти воздушного винта // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.
7. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
8. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
9. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.12.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
10. Ridgard C. Advances in Low Temperature Curing Prepregs for Aerospace Structures // Proc. SAMPE 2000 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2000. Vol. 31. P. 1–10.
11. Ridgard C. Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace. Defense and Space Structures // Proc. SAMPE 2009 Conf. Baltimore: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2009. Vol. 54. P. 1–13.
12. Ridgard C. Next Generation Out of Autoclave Systems // Proc. SAMPE 2010 Conf. Seattle: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2010. Vol. 33. P. 1–18.
13. Boyd J., Maskell R.K. Product Design for Low Cost Manufacturing of Composites for Aerospace Applications // Proc. SAMPE 2001 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2001. Vol. 48. P. 59–90.
14. Repecka L., Boyd J. Vacuum-bag-only-curable prepregs that produce void-free parts // Proc. SAMPE 2002 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2002. Vol. 47. P. 1–13.
15. Bond G.G., Griffith J.M., Hahn G.L. et al. Non-Autoclave Prepreg Manufacturing Technology // Proc. SAMPE 2008 Conf. Memphis: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2008. Vol. 12. P. 58–74.
16. 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.
17. 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.
18. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 23–47.
19. Gaskell D.R. An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering. Macmillan Publishing Company, 1992. 687 p.
20. Kratz J., Hubert P. Anisotropic air permeability in out-of-autoclave prepregs: Effect on honeycomb panel evacuation prior to cure // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2013. Vol. 49. P. 179–191.
21. Lee C.W., Gibson T., Tienda K.A., Storage T.M. Reaction Rate and Viscosity Model Development For Cytec s Cycom 5320 Family of Resins // Proc. SAMPE 2010 Conf. Salt Lake City: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2010. Vol. 6. P. 1–15.
22. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Prepreg age monitoring via differential scanning calorimetry // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. Vol. 31. P. 295–302.
23. Kim D., Centea T., Nutt S.R. Out-Time Effects on Cure Kinetics and Viscosity for an Out-Of-Autoclave (OOA Prepreg: Modeling and Monitoring) // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol. 100. P. 63–69.

24. Kratz J., Hsiao K., Fernlund G., Hubert P. Thermal models for MTM45-1 and Cycom 5320 out-of-autoclave prepreg resin // *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 47. P. 341–352.
25. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Out Time Effects on VBO Prepreg and Laminate Properties // *Proc. SAMPE 2011 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2011. Vol. 31. P. 23–36.
26. Centea T., Hubert P. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT // *Composites Science and Technology*. 2011. Vol. 71. P. 593–599.
27. Cender T.A., Simacek P., Advani S.G. Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 53. P. 118–128.

References

1. *History of aviation materials science: VIAM – 75 years of search, creativity, discoveries*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2007, 343 p.
2. Terebenin B.P. *Technological features of manufacturing large-sized products from fiberglass. Fiberglass and other structural plastics*. Moscow: Oborongiz, 1960, 168 p.
3. Gunyaev G.M. *Design of high-modulus polymer composites*. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 159 p.
4. Mikhailin Yu.A. *Structural polymeric composite materials*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008, 822 p.
5. Brautman L. *Destruction and fatigue*. Moscow: Mir, 1978, 153 p.
6. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D. Carbon fiber based on a volume-reinforcing braided preform for an element of a propeller blade. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.
7. Donetskii K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
8. Donetskii K.I., Karavayev R.YU., Raskutin A.Ye., Dun V.A. Carbon fibers composite material on the basis of volume reinforcing triax braiding preforms. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 07. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: December 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
9. Donetskii K.I., Bystrikova D.V., Karavaev R.Yu., Timoshkov P.N. Application of polymeric composite materials for creation of elements of transmissions of aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 16, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
10. Ridgard C. Advances in Low Temperature Curing Prepregs for Aerospace Structures. *Proc. SAMPE 2000 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2000, vol. 31, pp. 1–10.
11. Ridgard C. Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace. Defense and Space Structures. *Proc. SAMPE 2009 Conf. Baltimore: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2009, vol. 54, pp. 1–13.
12. Ridgard C. Next Generation Out of Autoclave Systems. *Proc. SAMPE 2010 Conf. Seattle: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2010, vol. 33, pp. 1–18.
13. Boyd J., Maskell R.K. Product Design for Low Cost Manufacturing of Composites for Aerospace Applications. *Proc. SAMPE 2001 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2001, vol. 48, pp. 59–90.
14. Repecka L., Boyd J. Vacuum-bag-only-curable prepregs that produce void-free parts. *Proc. SAMPE 2002 Conf. Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2002, vol. 47, pp. 1–13.
15. Bond G.G., Griffith J.M., Hahn G.L. et al. Non-Autoclave Prepreg Manufacturing Technology. *Proc. SAMPE 2008 Conf. Memphis: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering*, 2008, vol. 12, pp. 58–74.
16. 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.

17. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
18. Kablov E.N. Aviation materials science in the XXI century. Prospects and tasks. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS; VIAM, 2002, pp. 23–47.
19. Gaskell D.R. *An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering*. Macmillan Publishing Company, 1992, 687 p.
20. Kratz J., Hubert P. Anisotropic air permeability in out-of-autoclave prepregs: Effect on honeycomb panel evacuation prior to cure. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 49, pp. 179–191.
21. Lee C.W., Gibson T., Tienda K.A., Storage T.M. Reaction Rate and Viscosity Model Development For Cytec s Cycom 5320 Family of Resins. *Proc. SAMPE Tech.2010 Conf.* Salt Lake City: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2010, vol. 6, pp. 1–15.
22. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Prepreg age monitoring via differential scanning calorimetry. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, vol. 31, pp. 295–302.
23. Kim D., Centea T., Nutt S.R. Out-Time Effects on Cure Kinetics and Viscosity for an Out-Of-Autoclave (OOA Prepreg: Modeling and Monitoring). *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, vol. 100, pp. 63–69.
24. Kratz J., Hsiao K., Fernlund G., Hubert P. Thermal models for MTM45-1 and Cycom 5320 out-of-autoclave prepreg resin. *Journal of Composite Materials*, 2012, vol. 47, pp. 341–352.
25. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Out Time Effects on VBO Prepreg and Laminate Properties. *Proc. SAMPE 2011 Conf.* Long Beach: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, 2011, vol. 31, pp. 23–36.
26. Centea T., Hubert P. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, pp. 593–599.
27. Cender T.A., Simacek P., Advani S.G. Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, vol. 53, pp. 118–128.

Информация об авторах

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

Городилова Наталья Александровна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Natalya A. Gorodilova, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 10.01.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.01.2023.

The article was submitted 10.01.2023; approved and accepted for publication after reviewing 16.01.2023.