

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86

НЕКОТОРЫЕ ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПОР В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ (обзор)

А.В. Хрульков¹, 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. При изготовлении конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) очень часто образуются дефекты в виде пор. Исследование причин образования пор в композитах началось около полувека назад и до сих пор является актуальным. Это связано с трудностями предотвращения их образования при современных технологиях изготовления ПКМ, таких как безавтоклавное формование и изготовление деталей повышенной сложности, а также из-за повышенной вязкости модифицированных смол. Для того чтобы устранить дефекты в виде пор, возникающих при производстве, необходимо провести поиск пути правильного выбора параметров переработки.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, поры, автоклавное формование, вакуумное формование

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.

Scientific article

SOME CAUSES OF VOIDS FORMATION IN POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)

A.V. Hrulkov¹, R.Yu. Karavaev¹, N.A. Gorodilova¹, K.I. Donetskiy¹

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

Abstract. In the manufacture of structures from polymer composite materials (PCM), defects in the form of pores are very often formed. The study of the causes of pore formation in composites began about half a century ago and is still relevant. This is due to the difficulty of preventing their formation with modern PCM manufacturing technologies, such as non-autoclave molding and the manufacture of parts of increased complexity, as well as due to the increased viscosity of the modified resins. To eliminate defects in the form of the time arising by production, it is necessary to carry out search of way of right choice of parameters of processing.

Keywords: polymer composite material, pores, autoclave molding, vacuum molding

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-72-86.

Введение

Объем рынка композитов в 2021 г. составил 12,92 млн тонн [1]. По оценкам экспертов, объем мирового рынка композитов вырастет в среднем на 3,67 % в год и достигнет к 2029 г. 17,24 млн тонн (рис. 1).



Рис. 1. Глобальный рынок композитов – прогноз до 2029 г. [1]

Показаны основные фирмы-производители композитов и распределение их производства по регионам, а также процентное соотношение термореактивных и термопластичных матриц. В зависимости от конечного использования рынок композитов делится на автомобильную и транспортную, аэрокосмическую и оборонную промышленность, ветроэнергетику, электротехнику и электронику, строительство и инфраструктуру, производство труб и резервуаров, морскую промышленность и другие. Сегмент «Автомобилестроение и транспорт» занимал наибольшую долю рынка, на которую в 2021 г. приходилось 24 %. Производители автомобилей по всему миру ведут поиск легких материалов для транспортных средств, которые могут обеспечить высокую топливную эффективность и соответствовать нормам и правилам, касающимся экологических проблем и низкого уровня выбросов углерода. Кроме того, композиционные материалы широко используются в электромобилях для изготовления различных компонентов и деталей, корпусов аккумуляторов и резервуаров для хранения топлива. Ожидается, что растущий спрос на электромобили также увеличит спрос на композиты в автомобильном и транспортном сегментах в течение прогнозируемого периода.

Возникшие глобальные экологические проблемы, такие как выбросы углерода, глобальное потепление, а также необходимость соблюдения норм контроля загрязнения окружающей среды правительствами стран по всему миру вызовут рост спроса на композиты. Основные компании по производству композитов стимулируют научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, для того чтобы производить недорогие материалы с требуемыми свойствами, что, как ожидается, будет способствовать росту рынка композитов.

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

Анализ сегментов рынка композитов

В зависимости от типа применяемого волокна композиционные материалы делятся на композиты из стекло- и углеволокон, а также из натурального волокна.

Сегмент стекловолоконных композитов занимал наибольшую долю, на которую в 2021 г. приходилось 62 % рынка. Это объясняется растущим спросом на такие материалы со стороны автомобильной, электротехнической и электронной промышленности, строительства, транспорта и ветроэнергетики. Композиты из стекловолокна обладают повышенными свойствами: высокой прочностью, весовой эффективностью, долговечностью и хорошей устойчивостью к атмосферным воздействиям, что вызывает спрос на продукцию в нескольких приоритетных отраслях конечного использования.

В США основными производителями конструкций из стеклопластиков являются фирмы Owens Corning, Nippon Electric Glass, CPIC и Johns Manville, продукция которых составляет >50 % от общего объема производства композитов в стоимостном выражении. Основными конечными потребителями стекловолокна в США являются транспорт, строительство, сектор труб и резервуаров, на которые приходится 69 % общего потребления.

Ожидается, что сегмент композитов из углеродного волокна продемонстрирует значительный рост (в среднем на 5,9 %) в течение прогнозируемого периода. Как правило, композиты из углеродного волокна содержат атомы углерода, которые связаны друг с другом в виде кристалла, направленного параллельно волокну. Углепластик обладает такими преимуществами, как низкое тепловое расширение, устойчивость к высоким температурам, химическая стойкость и высокая жесткость. Наличие этих свойств будет стимулировать рост рынка композитов в этом сегменте.

Применение таких композитов в аэрокосмической и оборонной промышленности будет увеличиваться самыми быстрыми темпами со среднегодовым ростом 6,73 % в течение прогнозируемого периода. Композиты широко используются при изготовлении внутренних и наружных деталей самолетов, в солнечных панелях космических кораблей и т. д. Такие свойства, как весовая эффективность, безопасность, надежность, малозаметность и отличные аэродинамические характеристики, отвечают требованиям к материалам для производства конструкций в аэрокосмической и оборонной отраслях.

Азиатско-Тихоокеанский регион занимал в 2021 г. долю рынка, на которую приходился 41 %. В настоящее время наблюдается растущий спрос со стороны различных отраслей конечного использования, таких как автомобилестроение и транспорт, аэрокосмическая и оборонная промышленность, электротехника и электроника, строительство и инфраструктура в основных экономиках этого региона (Китай, Япония и Индия).

С целью внедрения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производство разрабатываются Программы создания новых материалов и технологий [1–4], ведутся комплексные разработки связующих для различных технологий, в том числе безавтоклавных [5–8]. При внедрении конструкций из ПКМ большое внимание уделяется вопросу автоматизации процессов изготовления конструкций из них, освоению цифровых технологий и компьютерному моделированию [9–15]. Для определения влияния эксплуатационных факторов на свойства разработанных материалов проводятся исследования деградации свойств при воздействии повышенной влажности и температуры и других факторов. Проводятся работы по разработке термопластичных материалов для применения в конструкциях из ПКМ [16, 17].

Причины образования пор при изготовлении ПКМ

Образование и рост пор при изготовлении ПКМ неодинаковы для применяемых технологий изготовления из-за различия термодинамических и реологических явлений,

происходящих при этих процессах [18–20]. Например, для технологии LCM (liquid composite molding) широко изучается образование пор при пропитке, тогда как при автоклавном формовании больше внимания уделяется развитию пор в процессе формования. При производственных процессах, таких как безавтоклавная обработка ООА (out-of-autoclave) и автоматическая укладка препрега, образование пор также является предметом изучения.

Следует отметить следующие причины образования пор:

- захват воздуха при изготовлении связующего;
- различная скорость пропитки жгутов и межжгутового пространства;
- выделение летучих продуктов при отверждении полимерной матрицы;
- низкая величина вакуума при инфузии и формовании;
- влияние размеров формуемой заготовки и проницаемости;
- недостаток связующего;
- наличие зон, закрытых для вакуумирования;
- вид препрега.

Формирование пор при изготовлении связующих

Формирование пор происходит при различных технологиях обработки, в том числе при пропитке под давлением (RTM – формование с переносом смолы или пропитка под давлением) и при формовании с помощью вакуума (VARTM – формование с переносом смолы с помощью вакуума) [20]. В этих процессах существует несколько причин образования пор: попадание воздуха в связующее во время его изготовления; попадание влаги из воздуха при подготовке технологического пакета к формованию; недостаточная герметичность технологической сборки при формовании; механическое улавливание воздуха во время течения смолы; газ, образующийся в результате химических реакций во время отверждения; образование пор из растворенных газов в смоле.



Рис. 2 Лабораторный реактор для изготовления расплавных связующих [21] и участок изготовления расплавных связующих [22]

Для исключения попадания воздуха во время изготовления связующего следует применять реакторы с вакуумированием внутренней рабочей полости. Такая технология отрабатывается на лабораторных реакторах, а затем создаются линии для серийного производства связующих (рис. 2).

Образование пор при пропитке

При пропитке наполнителя связующим образование непропитанных участков в основном происходит из-за неоднородной структуры пропитываемой заготовки, что приводит к неравномерной проницаемости потоков внутри жгутов и в межжгутовом пространстве.

Из-за природы ПКМ поры могут формироваться в трех различных видах: микро, мезо и макро. Микропоры образуются между волокнами в жгуте, мезопоры – между жгутами, а макропоры – в большей зоне преформы, которые заметны невооруженным глазом. На рис. 3 представлена схема образования пор при пропитке.

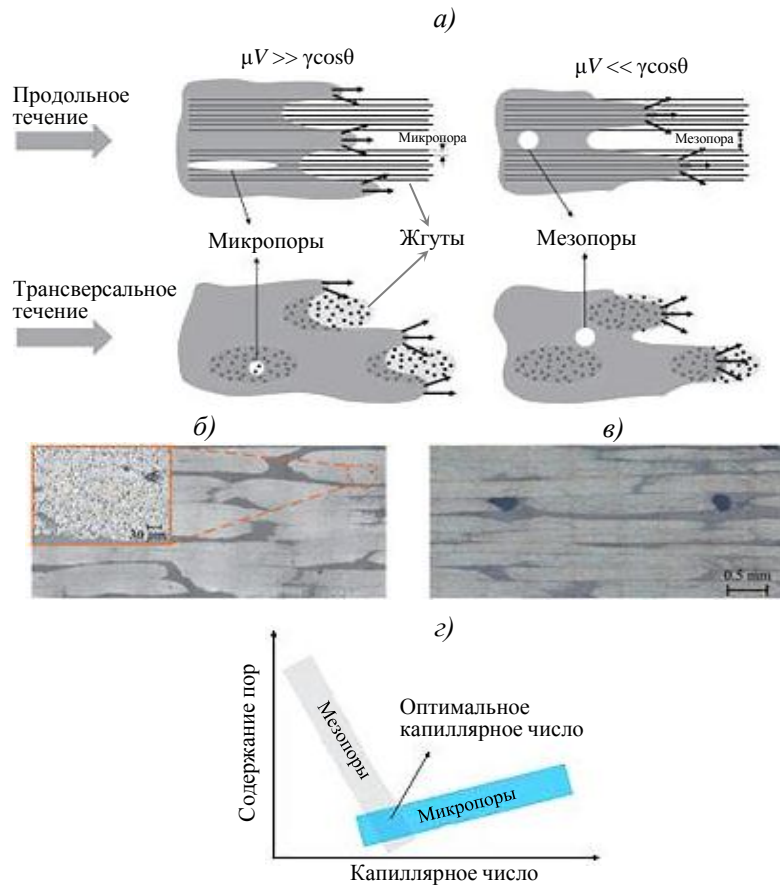


Рис. 3. Схема образования пор при продольном и трансверсальном течении связующего в волокнистой заготовке [22]

Образование пор зависит от скорости течения потока связующего на уровне жгутов и внутри них. Эти потоки сильно связаны и взаимодействуют друг с другом. В научно-технической литературе поры одного масштаба иногда имеют различные обозначения. Например, другое название макропоры – «сухое пятно», мезопоры – «межжгутовые» или «канальные» поры, а для микропор – это «внутрипучковые» или «внутрижгутовые» поры. Более того, мезопоры иногда неправильно называют макропорами.

Если гидродинамический поток быстрый, то мезопоры остаются незаполненными и образуются микропоры. С другой стороны, если преобладает капиллярный поток, то микропоры остаются незаполненными, и между жгутами образуются мезопоры.

Эта зависимость измеряется капиллярным числом (Ca), которое представляет собой безразмерную скорость, т. е. отношение вязкой силы к капиллярной силе.

Пропитка волокон внутри жгутов может быть неполной, что приводит к несмачиванию волокон, потенциально вызывая образование микро- и мезопор. Это характеризуется двумя различными величинами зазоров, которые должны быть заполнены потоком смолы: большие зазоры (мезопоры) между жгутами волокон и

небольшие каналы (микропоры) внутри жгутов между отдельными волокнами (рис. 3, а). Фактически, волокнистую заготовку можно рассматривать как две взаимодействующие и наложенные друг на друга непрерывные пористые среды, одна из которых содержит мезопоры, а другая – микропоры.

Между жгутами гидродинамическая сила вызывает вязкое течение смолы, а между волокнами, благодаря малому диаметру пор, поверхностное натяжение становится значительным, и таким образом впитывающий поток из-за капиллярного давления становится доминирующим фактором, управляющим потоком смолы. В работе [23] предложили модифицированное капиллярное число, учитывающее контактный угол «жидкость–волокно–воздух», вычислять по формуле

$$Ca = \frac{\mu V}{\gamma \cos \theta},$$

где V – макроскопическая скорость смолы; μ – вязкость смолы; γ – поверхностное натяжение смолы; θ – краевой угол смачивания волокна.

Согласно этой формуле, минимизация двойной пористости может быть достигнута путем выбора оптимального значения модифицированного капиллярного числа (рис. 3, з), которое соответствует оптимальной скорости смолы.

Сжатие и растворение пор

После образования пор их размер и форма могут измениться до окончания процесса отверждения. Это может произойти тремя способами: они могут сжиматься, растворяться в смоле или расширяться (рис. 4).

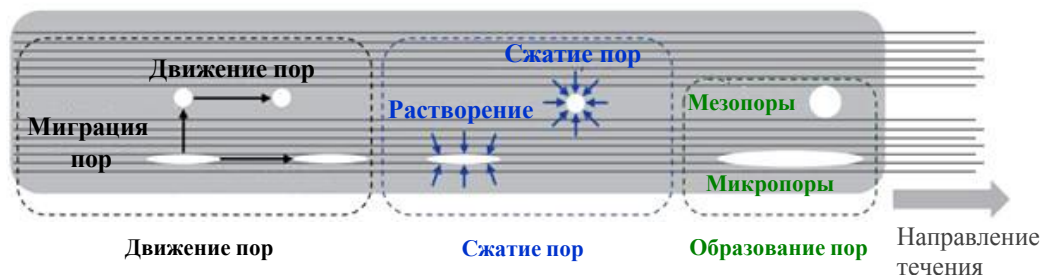


Рис. 4. Три стадии преобразования пор во время пропитки смолой наполнителя [24]

При пропитке происходит образование микро- и мезопор соответственно внутри и между жгутами; сжатие мезопор из-за увеличения давления смолы и микропоры из-за насыщения жгута; движение мезопор в межжгутовых каналах либо движение микропор внутри жгутов или в межжгутовых каналах [24].

При этом процесс преобразование пор может быть трех типов:

- образование пор внутри жгутов, в случае если давление воздуха внутри пор не увеличивается сразу с увеличением давления окружающей смолы, а смола не может проникнуть дальше в жгут, так как микропоры уже сильно уплотнены смолой;

- растворение или рост пор. Молекулы могут мигрировать по границе раздела «пора–смола», при этом происходит растворение газа в смоле за счет диффузии. Причем не только высокое давление, но также низкая исходная концентрация газа в дегазированной смоле улучшает растворение захваченных пор. Однако, если исходная концентрация газа или воды в смоле высокая, то поры будут расти, а не растворяться в смоле. Усадка пор или их расширение за счет диффузии зависит от того, является ли смола ненасыщенным или пересыщенным газом соответственно. При вакуумной

пропитке давление смолы снижается ниже атмосферного, а значит, смола становится пересыщенной газом, и молекулы газа, растворенные в смоле, диффундируют в пору, вызывая расширение пор;

– движение пор вместе с течением смолы. Образовавшиеся поры, выходя в межжгутовые области, движутся при пропитке вместе со смолой.

Помимо оптимизации модифицированного капиллярного числа, существуют другие способы снижения пористости:

- дегазация смолы перед инфузией;
- продолжение подачи смолы в технологический пакет или форму пока связующее будет выходить без воздушных включений;
- сжатие стенок пресс-формы во время впрыска;
- применение постоянного давления после наполнения (давление уплотнения) после впрыска;
- применение двойного мешка;
- применение вибрации к форме и т. д.

Величина проницаемости в зависимости от направления (армирования) по осям

Следует отметить, что скорость и продолжительность пропитки существенно зависят от проницаемости преформы или препрега.

На рис. 5 показаны направления, вдоль которых определялась проницаемость препрега, а в таблице – значения проницаемости для препрегов на основе однонаправленных тканей, равнопрочного и сатинового переплетения [25].

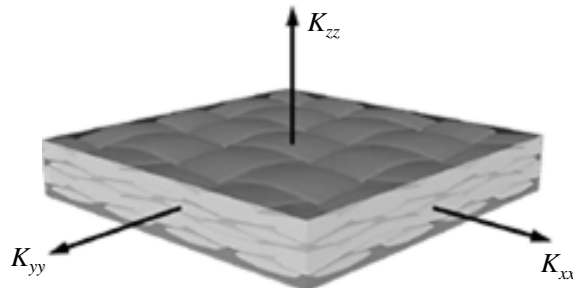


Рис. 5. Направление осей, вдоль которых определяется проницаемость тканей [25]

Проницаемость препрегов на основе однонаправленных и равнопрочных тканей при комнатной температуре

Материал	Проницаемость тканей, м ²		
	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}
Однонаправленный	$1,0 \cdot 10^{-15} \div 1,0 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-19} \div 1,0 \cdot 10^{-18}$	$1,0 \cdot 10^{-19} \div 1,0 \cdot 10^{-18}$
Равнопрочный	$3,8 \cdot 10^{-15} \div 1,1 \cdot 10^{-14}$	$3,8 \cdot 10^{-15} \div 1,1 \cdot 10^{-14}$	$5,0 \cdot 10^{-17} \div 7,8 \cdot 10^{-17}$
Сатинового плетения	$6,0 \cdot 10^{-15} \div 1,1 \cdot 10^{-14}$	$6,0 \cdot 10^{-15} \div 1,1 \cdot 10^{-14}$	$7,0 \cdot 10^{-18} \div 2,5 \cdot 10^{-17}$

Продольная воздухопроницаемость обычно на три-четыре порядка больше, чем поперечная воздухопроницаемость. При этом параметры K_{xx} и K_{yy} приблизительно эквивалентны для тканых или квазиизотропных однонаправленных препрегов и могут быть на несколько порядков больше, чем сквозная проницаемость (K_{zz}).

Проницаемость также сильно зависит от содержания смолы в препреге. На рис. 6 представлена воздухопроницаемость препрегов с разным содержанием связующего [26].

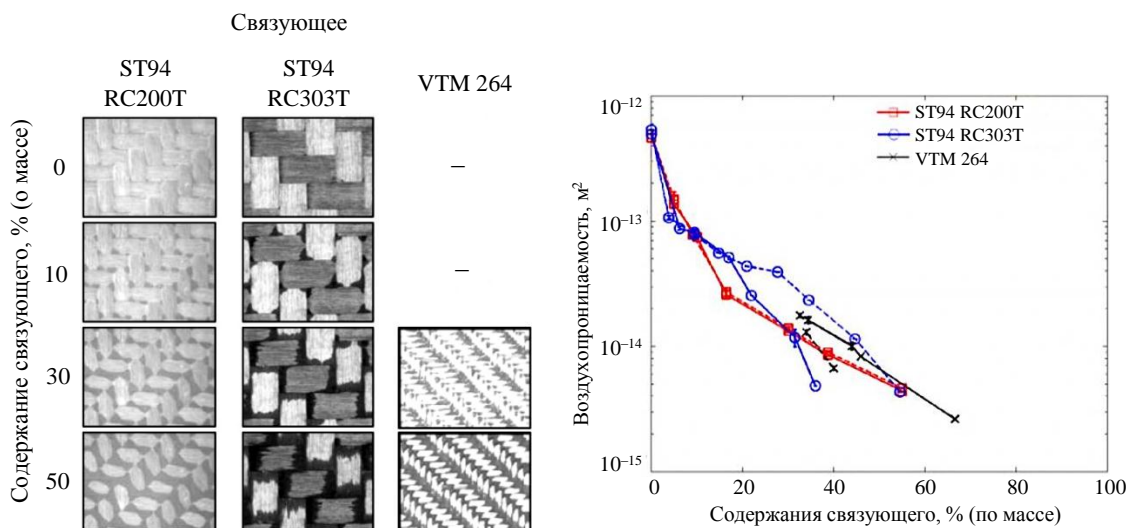


Рис. 6. Воздухопроницаемость препрегов в зависимости от содержания связующего [26]

Более высокая степень пропитки приводит к меньшей воздухопроницаемости и, следовательно, к более длительной продолжительности удаления воздуха. Это объясняется тем, что требуется больше времени для дегазации заготовки, так как недостаточно места внутри каналов (межгуттовых промежутках) для удаления газообразных продуктов из заготовки. Следовательно, первоначальный вид препрегов ООА имеет важное значение для возможности своевременного удаления газообразных продуктов из заготовки для ее формирования и, следовательно, для снижения пористости.

Влияние влажности в рабочем помещении на образование пор

В работе [19] показано, что высокого давления в автоклаве достаточно для подавления образования пор даже для препрегов с высоким уровнем поглощения влаги, тогда как при формировании без автоклава объемная доля пор увеличивается экспоненциально как функция влажности (рис. 3). При этом отмечается, что влажность и захваченный воздух являются доминирующими источниками пор в препрегах для безавтоклавного формирования, в то время как летучие вещества, образующиеся при отверждении, редко становятся источником пор [19]. На рис. 7 показана зависимость содержания пор от влажности в помещении, в котором происходила сборка пакетов препрега для формирования, и величины вакуумного давления.

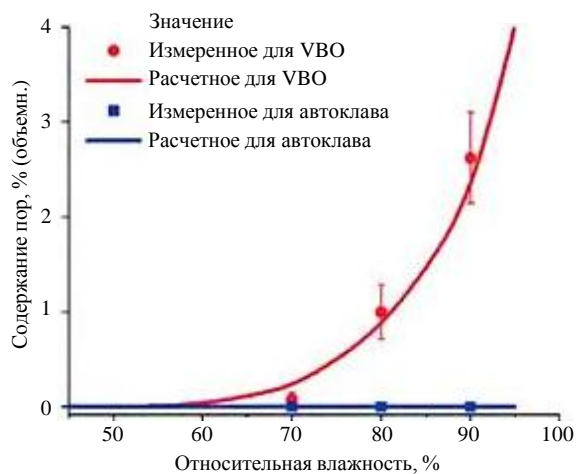


Рис. 7. Влияние исходной влажности в помещении на содержание пор в препреге (VBO – вакуумное формирование) [19]

В работе [27] для определения влияния влажности и вакуумного давления изготовлены двенадцать заготовок со стороной 64 мм, которые кондиционировали при различных уровнях относительной влажности и затем проводили отверждение под разным вакуумным давлением.

Все заготовки вакуумировали в течение 0,5 ч, затем разрезали и определяли количественно их пористость. Влияние продолжительности вакуумирования на пористость заготовок показано на рис. 8.

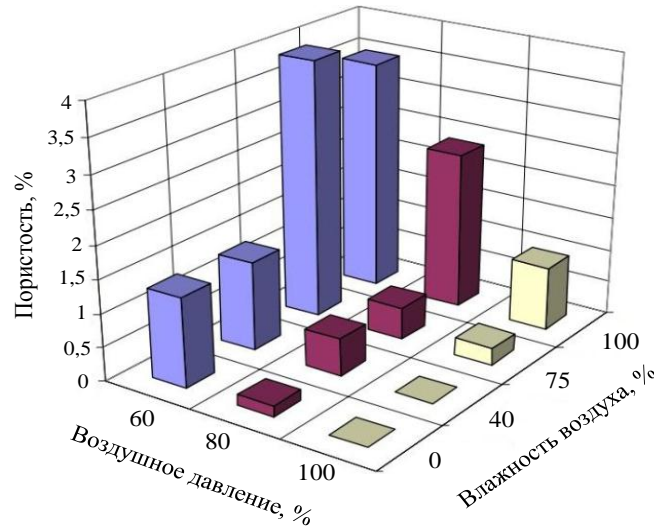


Рис. 8. Влияние влажности воздуха и величины вакуумного давления на пористость [27]

Очевидно, что пористость зависит от глубины вакуума и влажности воздуха в рабочей зоне. Чем больше величина вакуума и выше влажность воздуха, тем меньше пористость ПКМ.

Влияние размера детали и продолжительности вакуумирования на пористость пластика

В работе [27] исследовано влияние размера образца и продолжительности вакуумирования на пористость пластика. Для заготовки использовали препрег шириной 64 мм и длиной 300 и 1000 мм (рис. 9). Образцы кондиционировали либо в среде с относительной влажностью 75 %, либо оставляли открытыми в помещении с относительной влажностью воздуха ~40 %. Эти образцы перед отверждением также вакуумировали в течение 0,5 ч или 24 ч.

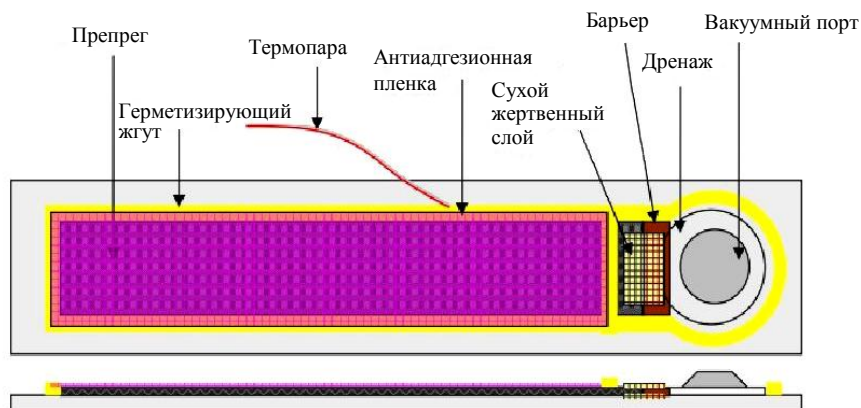


Рис. 9. Схема технологического пакета для определения влияния продолжительности вакуумирования на пористость пластика [27]

На рис. 10 показана зависимость пористости отформованного материала от влажности воздуха и продолжительности вакуумирования.

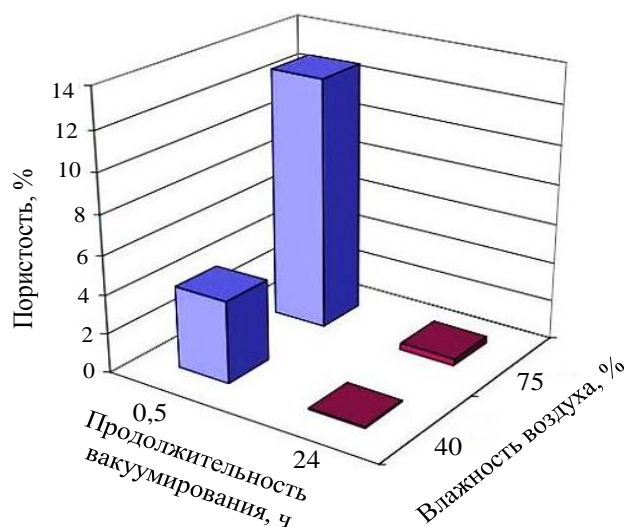


Рис. 10. Пористость образца в зависимости от влажности воздуха и продолжительности вакуумирования [27]

Видно, что на величину пористости существенно влияет как влажность воздуха, при которой происходила выкладка заготовки для формования, так и продолжительность вакуумирования этой заготовки.

Влияние вида препрегов

На рис. 11 представлены четыре препрега, которые изготовлены с использованием одной и той же смолы и ткани из углеродного волокна. Единственная разница между препрегами – вид распределения смолы [28]. Представлен схематический поперечный разрез, показывающий распределение смолы в препреге при пропитке со жгутами сухих волокон (позиция *a*); в однонаправленном препреге с центром из сухих жгутов (позиция *б*); в виде смоляной пленки на препреге с одной стороны образца (позиция *в*) и в виде полос смоляной пленки с чередованием сухих полос непропитанных жгутов (позиция *г*).

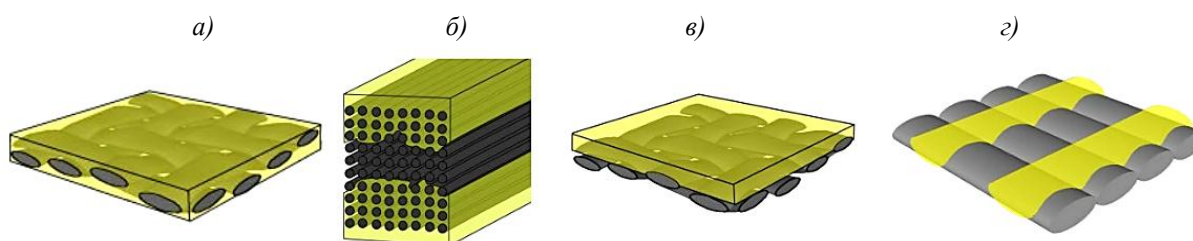


Рис. 11. Схемы предварительно пропитанных композиционных материалов (препрегов): со жгутами сухих волокон (*a*), углеродной лентой с сухими жгутами в центре (*б*), пленкой смолы на ткани (*в*) и полосками смолы на ткани (*г*) [28]

На рис. 12 представлено схематическое изображение процесса нанесения связующего с участками, не пропитанными связующим.

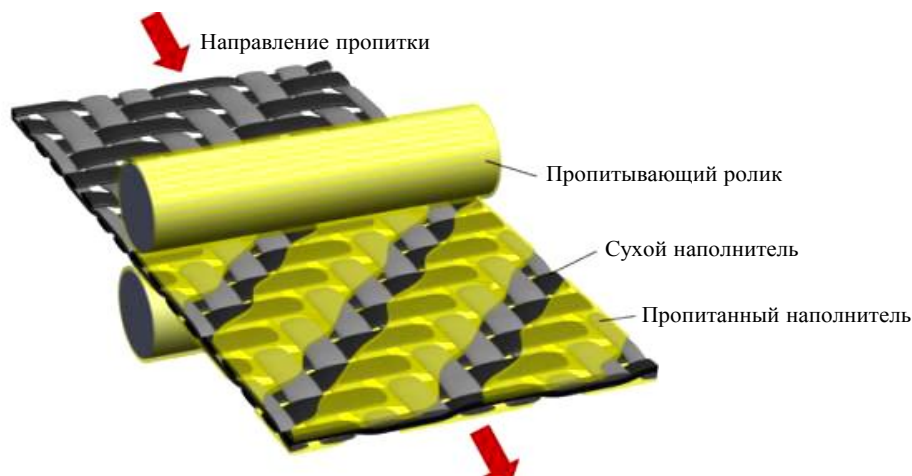


Рис. 12. Схематическое изображение процесса пропитки, при котором обеспечивается неравномерное распределение смолы [28]

Во время сборки пакета препрег выкладывали слой за слоем с прикатыванием уплотняющим валиком. Во время укладки препрега применялось давление, а при необходимости – нагрев, чтобы прикрепить каждый слой к предыдущему. При выкладке необходимо учитывать, что излишнее давление приведет к перераспределению исходной структуры смолы/волокна. Слишком сильное давление может отрицательно сказаться на характеристиках удаления газа, так как некоторые пути удаления воздуха могут быть заблокированы. Пузырьки вблизи свободной от смолы поверхности также могут мигрировать на поверхность смолы на этом этапе. После выкладки слоев собранный пакет помещают в вакуум для удаления всего воздуха и летучих веществ через непропитанные пористые каналы. После удаления газов из заготовки ее переносят в печь для формования. Поток связующего изначально создается за счет приложенного атмосферного давления, но как только смола достаточно пропитает ткань, только капиллярный поток может завершить полное насыщение наполнителя. Крайне важно, чтобы все пустые промежутки между волокнами были насыщены смолой до того, как вязкость смолы начнет увеличиваться и заготовка подвергнется процессу отверждения.

В качестве смолы в работе использовали: стандартную эпоксидную смолу и дициандиамида; эпоксидную смолу, полученную из жидкой эпоксидной смолы и бисфенола А (смола марки EPON 1001F фирмы Momentive/Hexion), а также эпоксидную смолу 40%-ной вязкости, полученную из бисфенола А и эпихлоргидрина (смола марки Epikote Resin 828 фирмы Momentive). К этой смеси добавили 6 частей порошкообразного дициандиамида (марки Technicure D-5 фирмы A&C Catalysts) и 3 части ароматически замещенной мочевины (марки Technicure MDU-11 фирмы A&C Catalysts). По этому рецепту получили эпоксидную смолу с вязкостью при комнатной температуре, достаточной для предотвращения текучести на холоде, но достаточно низкой (~1 Па·с) при высокой температуре для полной пропитки сухих участков волокнистого слоя во время нагрева до начала отверждения связующего.

Для производства препрега эпоксидной смолой пропитали саржевую ткань из углеродного волокна 2×2 с 6000 волокон на жгут и поверхностной плотностью 370 г/м². Для всех препрегов, исследованных в данной работе, содержание смолы составило 35 % (по массе).

В работе [18] при формировании ПКМ определена пористость при ручной и автоматизированной выкладке препрега. Исследования показали, что при автоматизированной укладке происходит уплотнение каждого слоя при повышенной температуре, пустоты между соседними слоями препрегов не образуются, что приводит

к уменьшению межламинарных участков для захвата воздуха. При температуре укладки 70 °С бóльшая часть пор в неотвержденном препреге также удаляется, достигая содержания 2 %, что можно качественно наблюдать на рис. 13 – чем меньше пор, тем однороднее ПКМ.

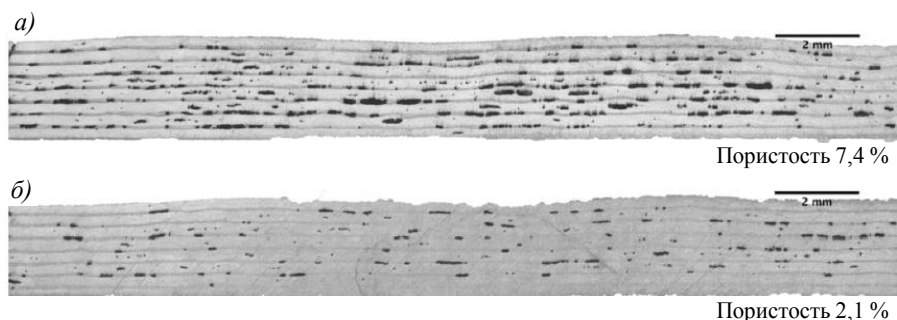


Рис. 13. Влияние температуры в процессе укладки на пористость углеродно-эпоксидного композита при отверждении вне автоклава при температурах 40 (а) и 70 °С (б)

Заключения

Развитие пор в пластиках, изготовленных вне автоклава, представляет собой сложный процесс, который зависит от многих факторов. Из рассмотренных материалов можно сделать вывод о том, что пористость зависит от различных факторов, приведенных в данном обзоре.

В целом отсутствие высокого давления в процессах безавтоклавного формования приводит к большей пористости в пластике.

На величину пористости влияют: захват воздуха при изготовлении связующего, повышенная влажность в воздухе при сборке пакета для формования, различная скорость пропитки жгутов и межжгутового пространства и другие технологические факторы.

Для изготовления деталей с пористостью менее 2 % необходимо соблюдать и учитывать всевозможные факторы и характеристики процессов изготовления связующего, процесса пропитки наполнителя, продолжительности вакуумирования деталей в зависимости от их размеров и вида применяемого препрега.

Перспектива безавтоклавных технологий не вызывает сомнений и для ее успешного внедрения необходимо более глубоко изучить влияние как отдельных факторов на порообразование, так и их совместное воздействие.

Список источников

1. Composites Market – Global Industry Analysis and Forecast (2022–2029) // MAXIMIZE MARKET RESEARCH: сайт. URL: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-composites-market/34243/> (дата обращения: 10.01.2023).
2. 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.
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. 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.
5. 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: 01.02.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-61-67.
6. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморективных 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: 01.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

7. 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.
8. 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.
9. 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: 02.02.2023) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
10. 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: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
11. 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: 18.01.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
12. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксаиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
13. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
14. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е., Бова В.Г., Войнов С.И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // *Пластические массы*. 2019. № 3–4. С. 43–46.
15. 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: 10.01.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.
16. 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: 01.02.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
17. Mahoor M., Gorbatikh L., Verpoest I., Lomov S. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // *Journal of Composite Materials*. 2018. No. 35. P. 25–69.
18. Centea T., Grunefelder L., Nutt S. A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. No. 70. P. 132–154.
19. Терешкова И. Создание термостойких полимерных композитов – одно из приоритетных направлений национального материаловедения. URL: <https://viam.ru/news/2734> (дата обращения: 13.01.2023).
20. Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Micro-scale flow behavior, fiber wetting and void formation in liquid composite molding // *Materials Science*. 1995. No. 35. P. 837–851.
21. Park C.H., Lebel A., Saouab A. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. No. 42. P. 658–668.
22. Hubert P., Centea T., Grunefelder L. Out-of-Autoclave Prepreg Processing // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2017. No. 9. P. 36–60.
23. Boey F., Lye S. Void reduction in autoclave processing of thermoset composites. I – High pressure effects on void reduction. II – Void reduction in a microwave curing process // *Composites*. 1992. No. 26. P. 126–150.
24. James K., Göran F. Processing conditions and voids in out of autoclave prepregs // *Department of Materials Engineering*. 2012. No. 6. P. 1–12.

25. Edwards W., Martínez P., Nutt S. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2020. No. 13. P. 26–39.
26. Кобина Э. ВИАМ расширит производство композитных материалов в Ульяновске // *Деловое обозрение: сайт*. URL: <https://uldelo.ru/2019/08/28/b-viam-rasshirit-proizvodstvo-b-kompozitnykh-materialov-v-ulyanovske> (дата обращения: 31.01.2023).
27. Kay J., Fahrang L. Effect of process conditions on porosity in out-of-autoclave prepreg laminates // *Engineering*. 2011. No. 10. P. 1–27.
28. Grunenfelder L., Dills A. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. No. 4. P. 37–60.

References

1. *Composites Market – Global Industry Analysis and Forecast (2022–2029)*. Available at: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-composites-market/34243/> (accessed: January 10, 2023).
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
6. 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 01, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
7. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
8. Veshkin E.A., Postnov V.I., Postnova M.V., Barannikov A.A. Experience in the use of vacuum infusion technologies in the production of PCM structures. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2018, vol. 20, no. 4-3, pp. 344–350.
9. 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: February 02, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
10. 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: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
11. 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: January 18, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
12. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
13. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Akhmadieva K.R. World market of high temperature polyimide carbon plastic (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
14. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Chernykh T.E., Bova V.G., Voynov S.I. Aramid fibers of the third generation Rusar NT for reinforcing organotextolites for aviation purposes. *Plasticheskie massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–46.
15. 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: January 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-82-90.

16. 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: February 01, 2023). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
17. Mahoor M., Gorbatiikh L., Verpoest I., Lomov S. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 2018, no. 35, pp. 25–69.
18. Centea T., Grunenfelder L., Nutt S. A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, no. 70, pp. 132–154.
19. Tereshkova I. *Creation of heat-resistant polymer composites is one of the priority areas of national materials science*. Available at: <https://viam.ru/news/2734> (accessed: January 13, 2023).
20. Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Micro-scale flow behavior, fiber wetting and void formation in liquid composite molding. *Materials Science*, 1995, no. 35, pp. 837–851.
21. Park C.H., Lebel A., Saouab A. Modeling and simulation of voids and saturation in liquid composite molding processes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, no. 42, pp. 658–668.
22. Hubert P., Centea T., Grunefelder L. Out-of-Autoclave Prepreg Processing. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2017, no. 9, pp. 36–60.
23. Boey F., Lye S. Void reduction in autoclave processing of thermoset composites. I – High pressure effects on void reduction. II – Void reduction in a microwave curing process. *Composites*, 1992, no. 26, pp. 126–150.
24. James K., Göran F. Processing conditions and voids in out of autoclave prepregs. *Department of Materials Engineering*, 2012, no. 6, pp. 1–12.
25. Edwards W., Martínez P., Nutt S. Process robustness and defect formation mechanisms in unidirectional semipreg. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2020, no. 13, pp. 26–39.
26. Kobina E. VIAM will expand the production of composite materials in Ulyanovsk. Available at: <https://uldelo.ru/2019/08/28/b-viam-rasshirit-proizvodstvo-b-kompozitnykh-materialov-v-ulyanovske> (accessed: January 31, 2023).
27. Kay J., Fahrang L. Effect of process conditions on porosity in out-of-autoclave prepreg laminates. *Engineering*, 2011, no. 10, pp. 1–27.
28. Grunenfelder L., Dills A. Effect of prepreg format on defect control in out-of-autoclave processing. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, no. 4, pp. 37–60.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.03.2023.

The article was submitted 28.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 06.03.2023.