

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67

МЕТОДЫ ИНФУЗИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор). Часть 1

К.И. Донецкий¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

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

Аннотация. В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяют вместо таких традиционных материалов, как сталь или дерево. Для крупногабаритных деталей из ПКМ процесс инфузии становится наиболее востребованным и часто используемым. По этой технологии изготавливают корпуса кораблей, лопасти ветроэнергетических установок, крылья самолетов. Цель данного обзора – рассмотрение различных видов инфузии, их достоинств, недостатков и перспектив применения.

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

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

Scientific article

INFUSION METHODS FOR THE MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review). Part 1

K.I. Donetskiy¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrul'kov¹

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

Abstract. Currently, polymer composite materials (PCM) are widely used instead of such traditional materials as steel or wood. For large-sized PCM parts, the infusion process is becoming the most popular and frequently used. This technology is used to manufacture ship hulls, wind turbine blades, aircraft wings. The purpose of this review is to consider various types of infusion, their advantages, disadvantages and prospects for use.

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

For citation: Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrul'kov 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

Введение

Многообразие конструкторских решений и требований по эксплуатации оборудования вызывает у технологов стремление усовершенствовать технологию инфузии и осуществлять разработку различных модификаций и усовершенствованных вариантов данного процесса.

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще применяют вместо таких традиционных материалов, как сталь или дерево. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана целая серия материалов для авиационной промышленности (изготавливают детали для планеров самолета и двигателей), исследованы их свойства, проведены испытания в различных климатических зонах [1–6]. Одной из основных тенденций при этом является стремление отказаться от автоклавной технологии, которую сейчас успешно применяют в авиационной промышленности, и перейти к безавтоклавной, открывающей широкие возможности при изготовлении крупногабаритных деталей недорогостоящим способом [7, 8].

В авиационной промышленности процесс инфузии применяют при изготовлении деталей крыла таких самолетов, как Bombardier CSeries (в настоящее время Airbus A220) и MC-21 [9]. В судостроение и производство лопастей ветроэнергетических установок данный процесс также внедрен для изготовления крупных конструктивных композитных деталей [10, 11]. Использование технологии пропитки преформ жидкой смолой, с одной стороны, обеспечивает требуемое качество наполнителя в будущем композиционном материале, а с другой стороны, дает возможность отказаться от дорогостоящего процесса автоклавной технологии. Следует также отметить, что компания «Юматекс» запустила в 2021 г. завод по производству ПАН-прекурсора, что позволяет использовать при производстве композитных конструкций отечественные наполнители, тем самым снижая зависимость от импортных компонентов [12]. Многие исследователи и компании занимаются усовершенствованием технологии инфузии. В научно-технической литературе и патентных источниках рассматривается большое количество инфузионных методов, которые составляют подгруппу группы Liquid Composite Molding [13].

Цель данной статьи – обзор существующих, а также новых разработок в области инфузии, их достоинств, недостатков и перспектив применения.

Технология инфузии. Принцип метода

В работе [14] рассмотрены процессы инфузии и показано историческое развитие данных методов. Термин «инфузия смолы под гибким инструментом» (Resin infusion flexible tooling – RIFT) используется в качестве собирательного термина для таких процессов.

Метод инфузии основан на принципе наличия разницы давления между источником смолы и вакуумным мешком (полостью, где находится формуемая заготовка). Принципиальное различие между инфузией и пропиткой под давлением (трансферное формование – Resin Transfer Moulding (RTM)) заключается в конструкции оснастки. При пропитке под давлением необходимо, чтобы половинки пресс-формы были жесткими и выдерживали давление впрыска, которое больше давления окружающей среды. При инфузии одну из половин формы заменяют гибкой пленкой, при этом давление в полости, где находится формуемая заготовка, меньше давления окружающей среды.

Часто при описании процесса инфузии говорят, что смола засасывается внутрь рабочей полости. Однако с научной точки зрения данное утверждение неверно. Движущей силой, заставляющей смолу двигаться при процессе пропитки методом инфузии, является разница давлений между резервуаром со смолой и полостью, в которой находится формуемая заготовка. Смола не всасывается в полость, а вдавливается в нее независимо от того, идет ли речь о процессе RTM или об инфузии.

Общее описание метода инфузии

При реализации процесса инфузии имеют место следующие операции.

Сначала осуществляется подготовка оснастки с целью обеспечения возможности отделения от нее композитной детали и вспомогательных материалов. Для этого

поверхность оснастки обрабатывают антиадгезионным составом или накрывают разделительной пленкой.

Затем выполняют выкладку заготовки образца или детали. Выкладка может производиться послойно, в том числе с помощью автоматизированной технологии, или пакет заготовки готовится заранее в виде преформы из плетеного наполнителя либо в виде прошивных многослойных тканей.

Далее проводят сборку технологического пакета и его проверку на герметичность. Это обязательная операция, так как в том случае, если пакет будет негерметичным, при пропитке смола потечет по пути наименьшего сопротивления и часть заготовки окажется непропитанной.

Поскольку герметизация осуществляется с помощью вакуумного мешка, а полость вакуумируется, толщина заготовки со смолой изменяется вследствие разницы давлений. Когда смола вдавливается в полость давлением окружающей среды, давление в полости увеличивается. Это вызывает разнотолщинность, т. е. толщина в зоне впрыска будет больше, чем по мере продвижения фронта потока смолы (рис. 1).

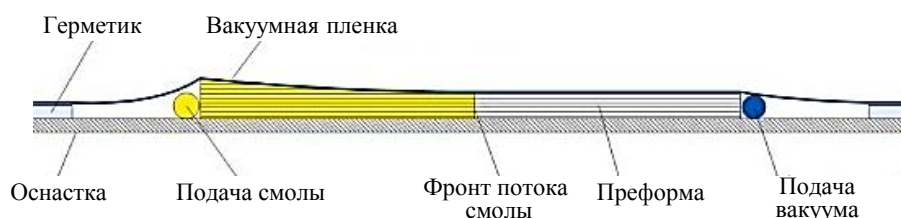


Рис. 1. Изменение толщины заготовки вследствие разницы давления в процессе вакуумной инфузии [15]

В зависимости от габаритных размеров и конфигурации заготовок предусматривается для обеспечения их качественной пропитки различное количество литниковых каналов. Количество каналов выбирают либо на основе опытных работ, либо на основании моделирования процесса. Так, для пропитки заготовок арок моста выбрали схему, учитывающую время, затрачиваемое на пропитку, и, соответственно, состоящую из трех точек впрыска связующего и двух точек вакуумирования [16]. В статье [17] предложено по длине пропитываемой детали располагать спиральную трубку подачи связующего, что обеспечивает качественную пропитку. Такая схема пропитки арочного элемента предполагает, что по всей длине арочного элемента находится спиральная трубка подачи связующего, которая на концах изделия оборачивается по ее окружности. Таким образом, фронт распространения связующего в процессе пропитки распределяется не локально по отдельным областям, а охватывает всю длину арочного элемента.

Обзор инфузионных процессов

В научно-технической литературе и патентных источниках представлено большое количество способов и процессов инфузии. В 1950 г. Ирвинг Маскат (Marco Chemicals Company) запатентовал (заявка подана в 1945 г.) базовый метод пропитки, при котором сухой волокнистый материал помещают между полужесткими формами. Данный метод известен как метод Марко [18]. Используют два варианта пропитки (рис. 2). Во-первых, смола может находиться под давлением. Таким образом, она нагнетается в полость между половинками формы, а воздух вытесняется из полости. Во-вторых, можно использовать источник вакуума, который создает перепад давления между резервуаром для смолы и полостью. Эта разница давлений способствует

выталкиванию смолы в полость, и волокнистый материал пропитывается. В патенте [18] также упоминается, что следует герметизировать открытые концы формы и использовать трубку для соединения с резервуаром для смолы.

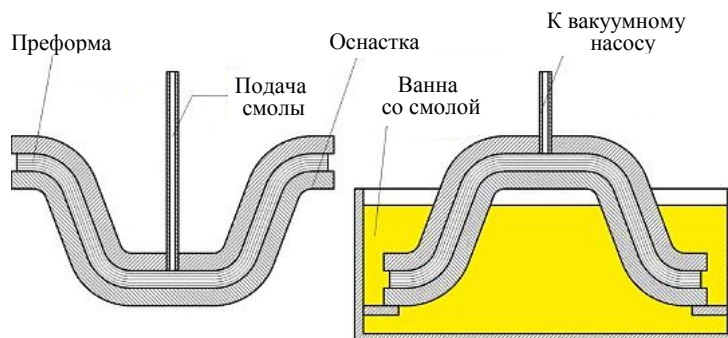


Рис. 2. Схема пропитки по методу Марко [18]

В 1963 г. Филип Грин (English Electric Company) запатентовал метод вакуумной инфузии [19]. Описание соответствует методу вакуумного трансферного формования смолы (Vacuum Assist Resin Transfer Molding – VaRTM), поскольку он представлен во многих публикациях, однако аббревиатура в данном патенте не упоминается. Как видно на рис. 3, сухой волокнистый материал помещают в форму и запечатывают гибкой пленкой вакуумного мешка. Для пропитки пространство между пленкой вакуумного мешка и формой вакуумируется вакуумным насосом. После открытия впускного клапана смола вытекает из резервуара со смолой в полость и пропитывает волокнистый материал. Поток останавливается, когда смола начинает заполнять ловушку для смолы. В качестве опции упоминается, что смола может находиться под давлением для улучшения текучести, но это не обязательно.

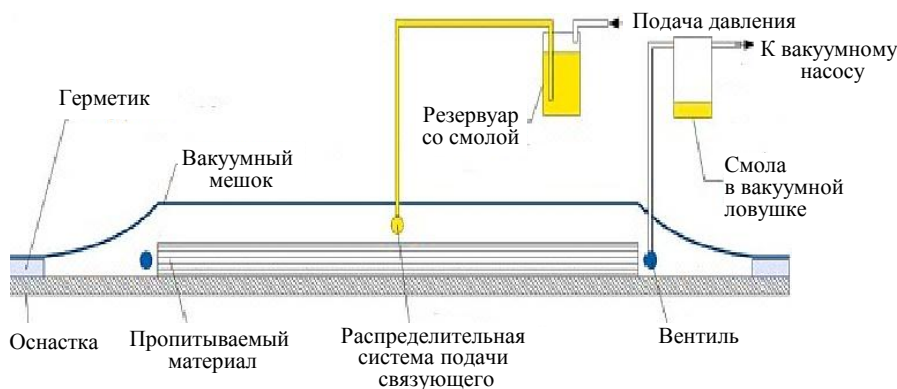


Рис. 3. Схематическое изображение процесса VaRTM [19]

Процесс вакуумного литья смолы (Vacuum assisted resin infusion – VARI) или вакуумной инфузии смолы (Vacuum Resin Injection Moulding – VRIM) [20] запатентован компанией Lotus Car Ltd в 1972 г. Как видно из рис. 4, при пропитке под вакуумным давлением (Light Resin Transfer Molding – LRTM) для пропитки сухого волокнистого материала используют две полужесткие пресс-формы. Перед пропиткой сухой волокнистый материал помещают между формами и в полость заливают отмеренное количество смолы (рис. 4, а). Затем полость вакуумируется, в результате верхняя половина пресс-формы прижимается вниз (рис. 4, б). Это движение заставляет смолу пропитывать сухой волокнистый материал [21]. Особенностью способа, представленного на рис. 4, в, является то, что смола подается под давлением.

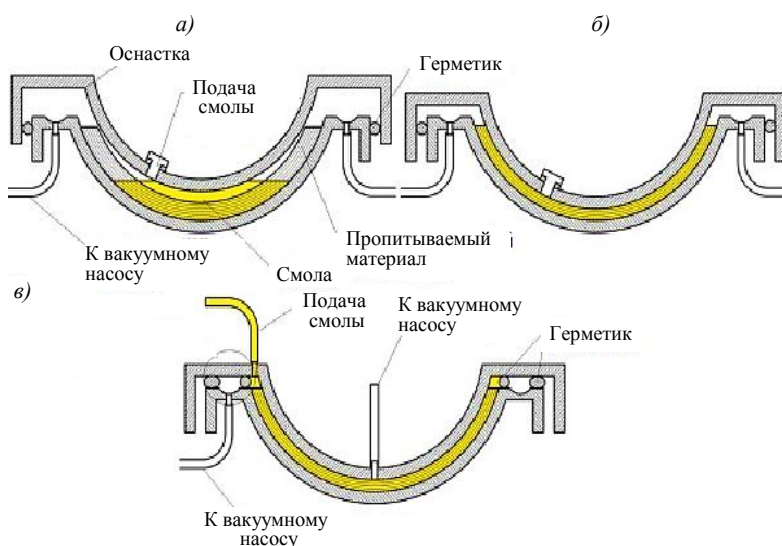


Рис. 4. Схематическое изображение процессов VARI (а, б) и LRTM (в) [21]

Компания Le Comte запатентовала процесс, в котором полосы из пенопласта используют внутри полости для распределения смолы (литье смолы под низким давлением – Light Pressure Transfer Molding (LPRIM)). Полоски имеют канавки, по которым может течь смола. Как только смола достигает концов канала, их можно закрыть нажатием [22]. Для пропитки сухого волокнистого материала с помощью процесса формирования двойной диафрагмы RIFT (DRDF) или процесса вливания смолы между двойными гибкими инструментами используются два вакуумных (из пленки) или два силиконовых мешка. Таким образом, волокнистый материал помещается между двумя мешками, и полость вакуумируется. Во избежание проблем с инфузией, возникающих при складывании волокнистого материала, сборку (установку технологических материалов и вакуумных мешков) мешков и волокнистого материала удерживают при данном процессе в плоском горизонтальном положении. После того как волокнистый материал полностью пропитан, сборка формируется с помощью вакуумной камеры и формы. Для этого она зажимается над вакуумной камерой и за счет вакуумирования последней перепад давления деформирует сборку над формой (рис. 5). Этот этап процесса напоминает процесс глубокой вытяжки или термоформования [23].

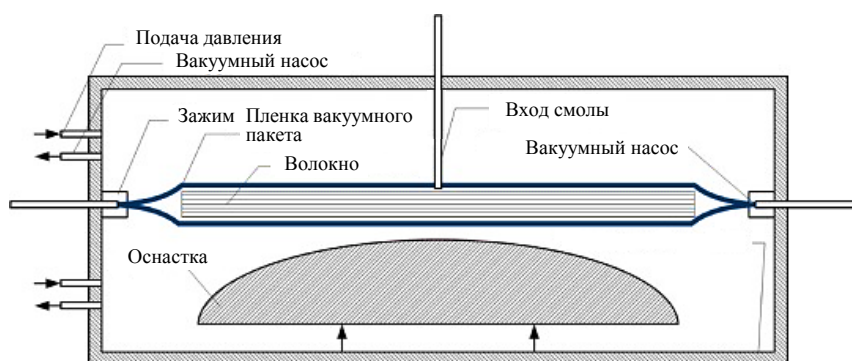


Рис. 5. Схематическое изображение процесса RIFT (DRDF) [24]

Другой процесс пропитки – это метод рециркуляции с впрыском смолы (Resin Injection Recirculation Method – RIRM). Смола для пропитки хранится в резервуаре, который также служит ловушкой для нее. Полость вакуумируется (0,017–0,05 МПа), и

смола закачивается в полость (0,02–0,14 МПа). Смола вдавливается в полость до тех пор, пока она снова не появится в ловушке для смолы, и смола перекачивается из ловушки для смолы обратно в полость. Этот цикл продолжается до полной пропитки сухого волокнистого материала [19]. Процесс однолинейной инфузии (Single line injection – SLI) запатентован Немецким аэрокосмическим центром в 2000 г. В данном процессе для вакуумирования и инфузии используется одна линия. Это стало возможно благодаря использованию тройника в смоле и линии откачки. На рис. 6 показаны отдельные этапы процесса. Сначала отсоединяется линия к резервуару для смолы (рис. 6, а), что позволяет отвакуумировать рабочую полость. На следующем этапе линия к полости и к вакуумному насосу закрывается (рис. 6, б). При открытии линии к резервуару для смолы смола поступает к зажимам. Пузырьки воздуха можно удалить, отсоединив линию от вакуумного насоса во второй раз. Наконец, линия к детали снова открывается и смола стекает в полость (рис. 6, в). Согласно патенту [25], отсутствует дополнительная линия вакуумирования. Поэтому в полости должна быть предусмотрена возможность промывки или замены на чистые линии вакуумирования и подачи смолы.

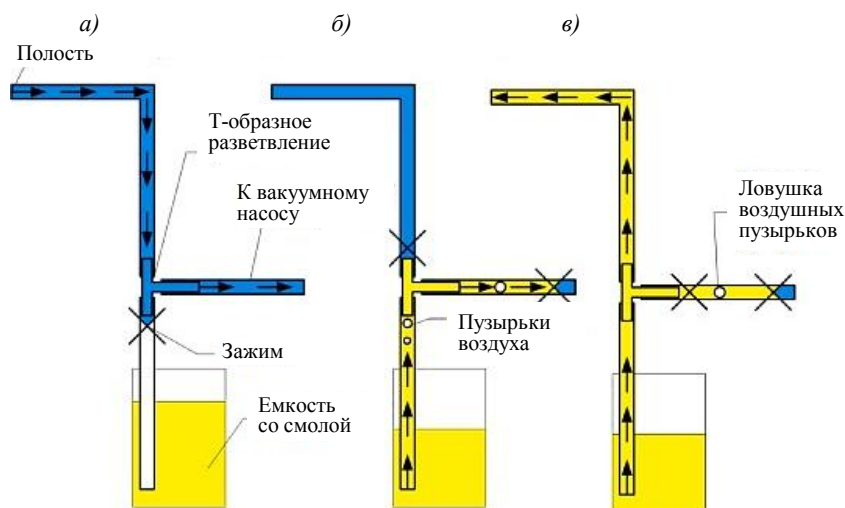


Рис. 6. Схематичное изображение процесса SLI [25]

Этапы процесса и отдельные условия давления для процесса вакуумной инфузии с перепадом давления (Vacuum Assistant Double Pressure Infusion – VADPI) показаны на рис. 7. В этом процессе используются каналы распределения смолы вне полости. Перепад давления между полостью и каналом деформирует вакуумный мешок и создает проточный канал для распределения смолы в полости. Поскольку давление в зоне канала меньше давления окружающей среды, проницаемость волокнистого материала увеличивается. Конструкция канала может быть спроектирована таким образом, что создается дополнительный канал из чистой смолы. Расположение нескольких каналов зависит от их геометрической формы и может быть, например, в форме ромба. Большая поверхность заготовки детали делится на небольшие участки, которые легко пропитать. В конце процесса инфузии к каналу прикладывается давление окружающей среды, и излишки смолы удаляются из области канала. Таким образом, на поверхности детали следов канала не остается [26].

Поскольку качество и экономичность производства компонентов из волокнистых композиционных материалов имеет важное значение при их успешном выводе на рынок, в Институте строительной механики разработан процесс SLI с целью получения высококачественных деталей из ПКМ. Такой процесс может быть оптимизирован для

производства небольших серий и прототипных конструкций в количестве до 500 шт. в год. По данной технологии можно изготавливать детали для самолетов, железных дорог и прототипов транспортных средств, а также использовать ее в строительстве. Подход к разработке метода SLI, по существу, заключается в объединении технологии инфузии жидкой смолы с автоклавным формованием композита. На рис. 8 изображена схема процесса SLI.

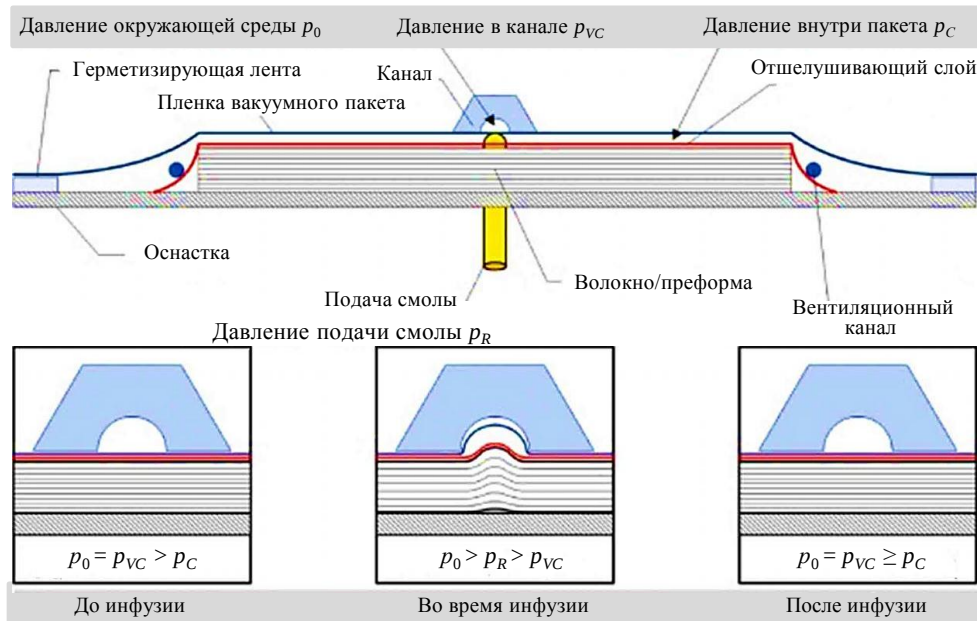


Рис. 7. Схематичное изображение процесса VADPI [26]

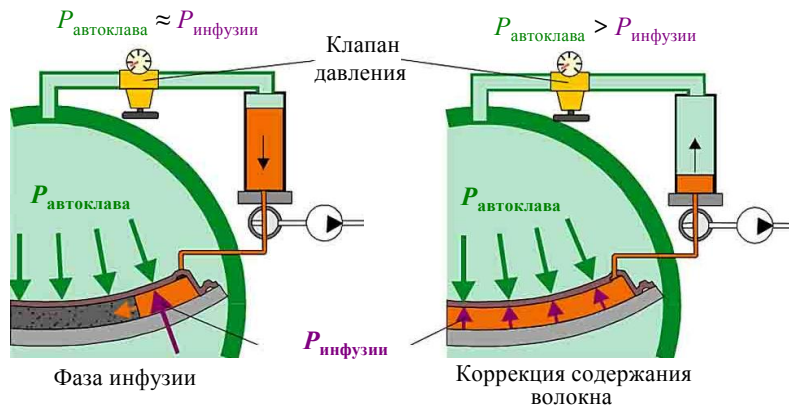


Рис. 8. Схематичное изображение процесса SLI [14]

Преимущество данного метода, по сравнению с методом VARI, заключается в том, что смола впрыскивается под давлением и ламинат можно уплотнить под давлением автоклава. Название метода указывает на то, что эвакуация волокнистой заготовки, а также закачка связующего осуществляются по той же линии. Эта комбинация впрыск/линия откачки может быть расположена на волокнистой заготовке в любом месте так, чтобы сократить путь и, соответственно, время впрыска. С помощью метода SLI можно комбинировать нетканый и сухой тканый материал, например такой, как ткани простого переплетения и трикотажные полотна с оптимальной матричной структурой для каждого типа деталей. В дополнение к стандартным эпоксидным смолам, винилэфирной смоле, полиизоциануратам, термостойким смолам, таким как бисмалеимид, также можно использовать и фенольные смолы. Данная технология

обеспечивает высокое качество ПКМ без пор и расслоений благодаря применению автоклавного процесса формования на финальном этапе изготовления изделия. Дополнительным «бонусом» метода SLI является возможность прямого воздействия на содержание волокна в пластике с помощью изменения параметров процесса, обеспечивающих равновесие внутреннего давления смолы, «сопротивления» волокнистого материала и давления автоклава. Если давление в автоклаве отрегулировано так, что оно соответствует внутреннему давлению смолы, то происходит пропитка наполнителя непосредственно за счет вакуумной инфузии. В том случае, когда наполнитель полностью пропитан, автоклав, обеспечивающий избыточное давление на вакуумный пакет, может «задавить» давление впрыска и тем самым обеспечить желаемое содержание волокна в ПКМ (обычно 60 % (по массе)).

Процессы инфузии RIFT типа I могут быть применены в сочетании с другими методами. При этом их не всегда легко отличить, так как, например, процедура инфузионной пропитки под давлением (Resin Infusion Transfer Moulding – RITM) может сочетаться с другими процедурами инфузии. Процесс SLI также сочетается с процессом двойного давления при пропитке под давлением (Double pressure transfer moulding – DP-RTM) для производства обтекателей Do328 [25].

Заключения

Представлены методы инфузии, рассмотренные в научно-технической литературе и патентных источниках.

Процессы инфузии имеют различные модификации и могут использоваться в сочетаниях с другими методами.

Процесс инфузии связующего в сухой наполнитель несомненно является перспективным как с точки зрения возможности изготовления крупногабаритных деталей, так и с точки зрения экономической эффективности.

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 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.

- 9 Авиация России: МС-21 – лайнер с «черным» крылом. URL: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (дата обращения: 16.02.2022).
- 10 Францев М.Э. Проектный анализ водоизмещения однокорпусных противоминных кораблей из композиционных материалов // Композитный мир. 2020. № 4. С. 58–69.
- 11 Соловьева А.А., Кулак К.С., Артамонова Е.Ю. Использование композиционных материалов при проектировании ветроэнергетических установок // Молодой ученый. 2016. № 22 (126). С. 50–54.
- 12 Юматекс Росатом запустил в промышленное производство ПАН-завод. URL: <https://umatex.com/news/yumateks-rosatom-zapustil-v-promyshlennoe-proizvodstvo-pan-zavod/> (дата обращения: 16.02.2022).
- 13 Advani S.G., Sozer E.M. Process modeling in composites manufacturing. New York: CRC Press, 2010. 630 p.
- 14 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.
- 15 Hindersmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 126. P. 55–83.
- 16 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: 17.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
- 17 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.
- 18 Method of molding: pat. US2495640A. No. 598339; filed 31.05.46; publ. 24.01.50.
- 19 Improvements in or relating to methods of producing Reinforced Plastic Structures: pat. GB944955A. No. 13029/60; filed 12.04.60; publ. 18.12.63.
- 20 Method and apparatus for producing a thin-walled article of synthetic resin, in particular a large-sized article: pat. US4359437A. No. 242295; filed 11.03.80; publ. 16.11.82.
- 21 Moulding cooling fan operating circuits for road vehicles: pat. GB1432333A. No. 14946/72; filed 30.03.72; publ. 14.04.76.
- 22 Method for manufacturing an object of synthetic resin: pat. US5096651A. No. 527450; filed 23.05.90; publ. 17.03.92.
- 23 Lazarus P. Resin infusion of marine composites // International SAMPE symposium. 1996. No. 41. P. 1447–1458.
- 24 Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM – Verfahren, Germany: pat. DE19853709C1; filed 20.11.98; publ. 10.02.00.
- 25 Vakuuminfusionsverfahren und Vorrichtung dafür, German, French: pat. EP2700493B1; filed 24.08.12; publ. 16.09.15.
- 26 Herrmann A., Pabsch A., Kleineberg M. SLI-RTM fairings for Fairchild Dornier DO 328 Jet // SAMPE Europe conference. 2001. P. 1–12.

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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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 17, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
9. Aviation of Russia: MS-21 – an airliner with a "black" wing. Available at: <https://aviation21.ru/ms-21-lajner-s-chyornym-krylom/> (accessed: February 16, 2022).
10. Frantsev M.E. Design analysis of the displacement of single-hull anti-mine ships made of composite materials. *Kompozitnyy mir*, 2020, no. 4, pp. 58–69.
11. Solovieva A.A., Kulak K.S., Artamonova E.Yu. The use of composite materials in the design of wind power installations. *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 22 (126), pp. 50–54.
12. Umatex Rosatom launched a PAN plant into industrial production. Available at: <https://umatex.com/news/yumateks-rosatom-zapustil-v-promyshlennoe-proizvodstvo-pan-zavod/> (accessed: February 16, 2022).
13. Advani S.G., Sozer E.M. *Process modeling in composites manufacturing*. New York: CRC Press, 2010, 630 p.
14. 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.
15. Hinderstmann A. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, pp. 55–83.
16. 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 17, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-7-11-11.
17. 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.
18. *Method of molding*: pat. US2495640A. No. 598339; filed 31.05.46; publ. 24.01.50.
19. *Improvements in or relating to methods of producing Reinforced Plastic Structures*: pat. GB944955A. No. 13029/60; filed 12.04.60; publ. 18.12.63.
20. *Method and apparatus for producing a thin-walled article of synthetic resin, in particular a large-sized article*: pat. US4359437A. No. 242295; filed 11.03.80; publ. 16.11.82.
21. *Moulding cooling fan operating circuits for road vehicles*: pat. GB1432333A. No. 14946/72; filed 30.03.72; publ. 14.04.76.
22. *Method for manufacturing an object of synthetic resin*: pat. US5096651A. No. 527450; filed 23.05.90; publ. 17.03.92.
23. Lazarus P. Resin infusion of marine composites. *International SAMPE symposium*, 1996, no. 41, pp. 1447–1458.
24. *Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM – Verfahren*: pat. DE19853709C1; filed 20.11.98; publ. 10.02.00.
25. *Vakuum infusions verfahren und Vorrichtung dafür*: pat. EP2700493B1; filed 24.08.12; publ. 16.09.15.
26. Herrmann A., Pabsch A., Kleineberg M. SLI-RTM fairings for Fairchild Dornier DO 328 Jet. *SAMPE Europe conference*, 2001, pp. 1–12.

Информация об авторах

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

Усачева Мария Николаевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Maria N. Usacheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 09.03.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.03.2022.
The article was submitted 09.03.2022; approved and accepted for publication after reviewing 17.03.2022.