
Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-75-87

ПОЛИМЕРНЫЕ БИНДЕРЫ В ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

Е.А. Афанасьева¹, Ю.М. Ширякина¹, Н.С. Китаева¹, А.А. Новикова¹

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

Аннотация. Проведен анализ научной и патентной литературы о современных методах изготовления полимерных композиционных материалов. Рассмотрены основные аспекты использования автоматической выкладки наполнителя для преформ и применения различных полимерных биндеров для стабилизации слоев наполнителя. Описаны требования, предъявляемые к полимерным биндерам, виды форм выпуска, природа химических структур, а также способы их нанесения. Представлены способы активации полимерных биндеров локального и общего действия.

Ключевые слова: полимерные биндеры, автоматизированная выкладка волокон, автоматизированная выкладка лент, полимерные композиционные материалы, инфузионная технология, VaRTM

Для цитирования: Афанасьева Е.А., Ширякина Ю.М., Китаева Н.С., Новикова А.А. Полимерные биндеры в прогрессивных технологиях получения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-75-87.

Scientific article

POLYMER BINDERS IN ADVANCED TECHNOLOGIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS PRODUCTION (review)

Е.А. Afanaseva¹, Yu.M. Shiriakina¹, N.S. Kitaeva¹, A.A. Novikova¹

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 article analyzes the scientific and patent literature about modern methods of manufacturing polymer composite materials. The main aspects of using automatic filler laying for preforms and the use of various polymer binders for stabilizing filler layers are considered. The requirements for polymer binders, types of production forms and the nature of the chemical structure, as well as their application are described. Methods of activation of polymeric binders by local and general actions are presented.

Keywords: polymeric binders, automated tape laying (ALT), automated fiber placement, polymeric composite materials, infusion technology, VaRTM

For citation: Afanaseva E.A., Shiriakina Yu.M., Kitaeva N.S., Novikova A.A. Polymer binders in advanced technologies of polymer composite materials production (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-75-87.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все более интенсивно интегрируются в окружающий человека мир как продукт индустриализации. Уникальный набор свойств позволяет им успешно конкурировать с традиционными материалами – металлом, бумагой, стеклом или бетоном. Полимерные композиционные материалы используются в космической и авиационной отраслях (крупногабаритные конструкции сложной формы, декоративная отделка), жилищно-коммунальном хозяйстве (трубы, емкости), строительной отрасли, медицине (протезы) и др. [1–7].

В свою очередь постоянно расширяется и спектр методов изготовления ПКМ, разнообразие которых позволяет более гибко подходить к решению конструкционных проблем. Каждый существующий метод переработки (автоклавное формование, контактное формование, намотка, безавтоклавные методы, прессование в формах и др.) обладает своими преимуществами и недостатками и применяется для решения конкретных задач [8–12]. Например, для изготовления индивидуального протеза стопы или иного малосерийного изделия целесообразно использовать одни технологии, а для корпуса корабля длиной >70 м – другие [2, 8].

Одними из перспективных можно назвать безавтоклавные методы формования ПКМ. Главными их преимуществами являются: отсутствие необходимости в крупногабаритном оборудовании (соответственно снижение затрат на его приобретение), отсутствие ограничений на размер изделия и скорость выпуска продукции, уменьшение количества бракованных изделий, сокращение времени укладки, минимизация зависимости от клейкости и драпировки, увеличение срока годности изделий [8, 13, 14]. Среди безавтоклавных методов все чаще применяют пропитки под давлением (Resin Transfer Moulding – RTM) [14, 15, 16–22] и вакуумную инфузию (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding – VaRTM) [8, 14, 17, 23, 24].

К технологиям с большим потенциалом также можно отнести технологию автоматизированной выкладки препрегов [9, 25–28]. Автоматизированные машины выкладывают ткань, предварительно пропитанную терморезактивным или термопластичным связующим (препрег), которую затем формуют, что гораздо эффективнее традиционных методов – ручная выкладка требует квалифицированных специалистов и кропотливой работы. Данным методом получают такие крупногабаритные конструкции, как обшивка крыла самолета или фюзеляж [2]. Применение препреговой технологии позволяет снизить себестоимость изделия, количество отходов, а также затраты на сборку и оснастку, которые обычно связаны с использованием дорогостоящего высококвалифицированного труда, и получить крупногабаритную конструкцию с минимальными отклонениями на сборочных узлах [9].

Однако с помощью данного метода невозможно решить весь спектр задач, возникающих в связи с запросами современных потребителей ПКМ: изготовление изделий сложной геометрической формы, маленького размера или индивидуального заказа с небольшим объемом выпуска. Это привело к необходимости модернизации метода и появлению автоматизированной выкладки сухого наполнителя [8, 25]. Формирование преформы из сухого наполнителя, а не из препрега, значительно расширяет возможности процесса ее автоматизированной выкладки, а также позволяет снизить зависимость от срока годности связующего для полимерной матрицы и улучшить качество труда благодаря уменьшению контакта персонала с токсичными веществами [17, 18].

Метод представляет собой разделенный на два этапа процесс производства: автоматическая выкладка сухой преформы с требуемым количеством слоев непропитанного наполнителя с желаемой ориентацией волокон в форму заготовки будущего изделия и последующая пропитка полимерной матрицей.

На практике безавтоклавные технологии эффективно сочетаются с автоматической выкладкой сухого наполнителя [5, 29]. Например, в настоящее время автоматизированную выкладку с последующей пропиткой методом вакуумной инфузии используют для производства в ООО «КБ Архипов» (кузов автомобиля, монококовая рама электробайка, протез стопы) и АО «Аэрокомпозит» (крыло самолета МС-21) [8, 30].

Как показано ранее, одним из этапов технологии автоматической выкладки сухого наполнителя является размещение сухого волокна по форме будущего изделия [31–33]. Сложность данного процесса заключается в предотвращении смещения наполнителя с образованием зазоров и нахлестов как в процессе сборки, так и при пропитке (когда заготовку помещают в закрытую форму или вакуумный пакет), т. е. до тех пор, пока заготовка не будет совмещена со связующим [18].

Смещение сухого наполнителя влияет на объемное локальное содержание волокна, а соответственно и на физико-механические свойства (в основном на прочность при растяжении в поперечном направлении, а затем и на прочность при разрыве в продольном направлении и модуль продольной упругости) [34]. При использовании в качестве сухого наполнителя однонаправленных жгутов или нитей, которые существенно склонны к разделению волокон, есть вероятность образования иных дефектов и локального изменения формы, что может привести к снижению физико-механических свойств [9, 16].

Решением обозначенных проблем становятся фиксация соседних слоев наполнителя путем нанесения на них вспомогательного агента (полимерного биндера) и поддержание точности выравнивания волокон еще в процессе сборки [16, 34], поскольку даже небольшое смещение наполнителя способно ухудшить свойства готового изделия и привести к дефекту или даже браку [32, 34].

Полимерный биндер представляет собой полимерную композицию, основной функцией которой является стабилизация преформы, т. е. внутренняя фиксация слоев сухого наполнителя для облегчения работы с ней до процесса производства ПКМ. Тип и количество полимерного биндера следует подбирать с учетом конечных свойств готового изделия, а также параметров процесса изготовления ПКМ, например с учетом совместимости с основным связующим, температуры пропитки и метода нанесения. В некоторых случаях с помощью применения полимерных биндеров можно улучшить физико-механические свойства получаемых ПКМ, что безусловно расширяет возможности разработки новых ПКМ без существенной модернизации процесса изготовления и материально-технической базы.

Основные требования и формы промышленного выпуска полимерных биндеров

Поскольку любые добавки в итоговую полимерную композицию матрицы могут значительно влиять на конечные свойства готового изделия, следует тщательно подходить к вопросу подбора полимерного биндера, соблюдая следующие общие требования:

- биндер должен иметь высокую адгезию к волокнам [34];
- его необходимо наносить в таком количестве, которое позволяет оставить полученную заготовку пористой для последующей пропитки связующим и не сможет негативно повлиять на свойства готового изделия [34]. Контроль за количеством также позволяет избежать как случайного смещения волокон в процессе укладки формы, так и образования пустотелых карманов внутри детали, которые снижают физико-механические свойства композита [35];
- окончательно переходить в жидкую фазу при контакте со связующим следует при температуре, которая выше температуры пропитки, но ниже температуры режима

отверждения [36], т. е. скрепляющая композиция должна удерживать при комнатной температуре слои и волокна наполнителя, а при температуре отверждения – совмещаться с матрицей [24, 36];

– необходимо, чтобы полимерный биндер после фазовых переходов не изменял своих свойств [36], т. е. обладал достаточной термической стабильностью для успешного склеивания волокнистых слоев в заготовку с последующей пропиткой;

– следует подбирать такой состав полимерного биндера, чтобы тот полностью совмещался со связующим, поскольку в противном случае может произойти понижение температуры стеклования, а значит и рабочей температуры эксплуатации готовой детали, а также изменение модуля упругости при растяжении или поглощении влаги [18, 33, 37];

– биндер не должен преждевременно отверждаться (из-за наличия катализатора в системе) на этапе нанесения на волокно и выкладки на оснастке, а также должен полностью растворяться в связующем (времени, отведенного на отверждение композиции, может оказаться недостаточно для полного совмещения матрицы с полимерным биндером). Неполное растворение способно привести к остаточным микронапряжениям на границе «связующее/биндер» и в конечном итоге к ухудшению механических свойств [33];

– применение биндера должно обеспечивать сохранение достаточной гибкости заготовки для сопротивления напряжениям (искажению формы) при хранении, перемещении или изменении формы изделия, чтобы избежать растрескивания и осыпания заготовки [38] или чтобы иметь больше возможностей для создания трехмерных деталей сложной геометрической формы [22, 39]. Это, безусловно, позволяет увеличить срок хранения заготовки [22, 24, 38, 39].

В зависимости от решаемых технологических задач полимерные биндеры можно разделить на несколько основных промышленно выпускаемых видов, которые представлены на рис. 1.

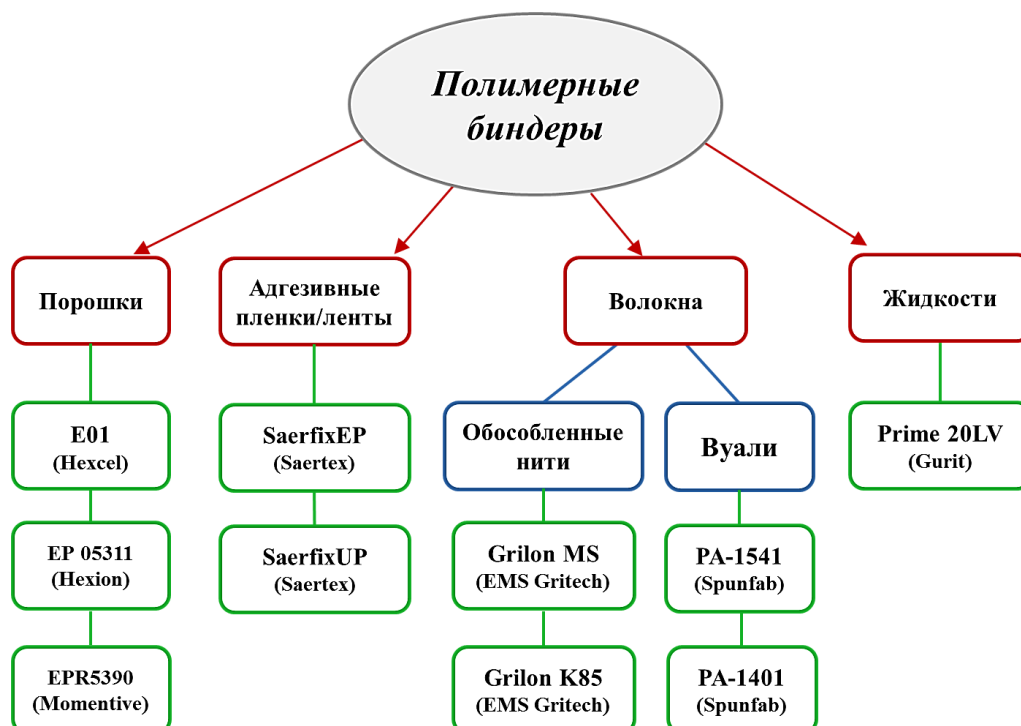


Рис. 1. Виды полимерных биндеров с примерами выпускаемых марок

Технологии совмещения полимерных биндеров с наполнителем достаточно разнообразны, поэтому их изготавливают разных видов (форм выпуска): порошок [17, 38], водная дисперсия [24, 40], адгезивные пленки (сетки) [17, 41], раствор в органических растворителях (спрей) [16] и волокна [31, 36, 42].

К способам нанесения полимерных биндеров относятся: нанесение на сухой наполнитель (порошки, жидкости), например с помощью спрея; расположение полимерного биндера между слоями наполнителя во время предварительного формования (адгезивные пленки, вуали); для упрощения технологического процесса некоторыми производителями используется вплетение полимерного биндера в виде нити непосредственно в сухие наполнители.

Рассмотрим подробнее основные аспекты нанесения различных видов полимерных биндеров.

Одним из достаточно распространенных способов нанесения полимерного биндера является порошковое покрытие. Это твердая сухая дисперсия с отсутствующей или умеренной липкостью при комнатной температуре и сильной липкостью при повышенной, что позволяет удерживать слои между собой и не выпадать из волокнистой формы. Порошок наносят на наполнитель либо с помощью аппарата ситового типа посредством электростатического распыления, либо экструдированием через щелевую головку [33]. Полное расплавление порошка должно происходить при температуре, которая ниже температуры отверждения и выше температуры пропитки [17, 38]. Следует помнить, что процесс нанесения порошка сопровождается возникновением электростатического заряда, образующегося на частицах. Данный фактор может влиять на равномерность распределения сухого наполнителя по поверхности [35]. После нанесения ткань с биндером обрабатывают, например нагревом и давлением, чтобы клеевая композиция распределилась внутри слоев, при этом проницаемость или сопротивление потоку связующего не должны зависеть от внутрислойного состояния [33].

Отличительная черта водной дисперсии полимерного биндера – это присутствие воды и поверхностно-активного вещества (ПАВ) в составе. Последний компонент позволяет добиться хорошего эмульгирования, что сохраняет дисперсию и, соответственно, равномерное распределение. Водная дисперсия полимерного биндера считается одной из наиболее безвредных для окружающей среды форм выпуска, хотя при ее применении требуется дополнительный этап тщательной просушки от влаги [40]. Важно удалить всю воду с поверхности наполнителя, поскольку это может негативно повлиять на свойства конечного изделия. В высушенном состоянии полимерный биндер должен иметь хорошую адгезию к волокну и не образовывать сплошных пленок, препятствующих пропитке связующим [17].

Полимерный биндер в виде раствора обладает своими преимуществами и недостатками. Пленка полимерного биндера на волокнах наполнителя может иметь толщину в диапазоне 0,2–10 мм. Распыление позволяет самостоятельно контролировать степень нанесения на ткань. Несмотря на то, что в таком виде полимерный биндер содержит в своем составе растворитель, его легко можно удалить с поверхности, даже не применяя термообработку [38]. Главным недостатком данного метода является опасность для здоровья ввиду наличия в составе растворителя [33].

Полимерный биндер в виде волокон вплетается непосредственно в ткань. В этом случае чаще всего его изготавливают из высокомолекулярных термопластов, которые способны растворяться в отверждаемой композиции. Особое преимущество данного метода нанесения заключается в том, что в таком виде полимерный биндер увеличивает прочность самой ткани, а его степень распределения по изделию легко контролировать еще в процессе резки и укладки наполнителя [36]. В иных случаях полимерный биндер только вплавляют в нить без изготовления из него цельного волокна [31].

Типы полимерных биндеров

Традиционно полимерные биндеры производят из термопластичных [43] и терморективных [16, 41, 44] смол или их смесей [17, 40], с отвердителем [38, 44] или без него [16].

Одним из компонентов полимерных биндеров, который можно часто встретить в описаниях, представленных в патентных источниках, являются эпоксидные смолы [16, 17, 40, 41, 44]. Это смолы, полученные из диглицидилового эфира бифенола, бисфенола, гидрокарбилзамещенного бифенола, гидрокарбилзамещенных бисфенолов, фенола, или гидрокарбилзамещенные бисфенолальдегидные новолачные смолы, ненасыщенные углеводородфенольные или гидрокарбилзамещенные фенольные смолы и их смеси, с эквивалентной массой эпоксиды (EEW) от 150 до 3000 [16, 40, 44]. Используют как жидкие (низкомолекулярные, в том числе и алифатические), так и твердые эпоксидные смолы (высокомолекулярные); одну смолу или их смесь; моно- или полифункциональные смолы. Эпоксидную смолу вводят в состав полимерных биндеров, в том числе и для увеличения адгезии к волокнам [17].

В качестве основы полимерного биндера часто рекомендуют к использованию термопласты, описание которых можно встретить в патентных источниках наравне с эпоксидными смолами. Примером является полиэфирсульфон [17, 24, 36, 43]. Его совмещение со связующим, наряду с увеличением упругих свойств, приводит к повышению вязкости, что критично для безавтоклавных методов изготовления ПКМ. Исключение же термопластов из состава связующего и нанесение их на ткань как части полимерного биндера позволяет избежать данной проблемы [36]. В качестве примера можно привести использование термопластов с размером частиц от 10 до 100 мкм и в соотношении к реактопласту как 1:10 [17].

Следующим основным компонентом, часто упоминаемым в патентных источниках, является полиимидная смола [40, 44]. В патенте [40] предлагают использовать бисмалеимидные смолы (4,4'-бисмалеимидодифенилметан, 1,4-бисмалеимидо-2-метилбензол и их смеси), модифицированные бисмалеимидные смолы, содержащие сомомеры Дильса–Альдера, и частично усовершенствованный бисмалеимид на основе 4,4'-бисмалеимидодифенилметана и аллилфенильных соединений или ароматических аминов. Сомомерами Дильса–Альдера можно назвать производные стирола и бис(пропенилфеноксид) соединения, 4,4'-бис(пропенилфеноксид)сульфоны, 4,4'-бис(пропенилфеноксид)бензофеноны и 4,4'-1-(1-метилэтилиден)бис(2-(2-пропенил)фенол). Используют также бисмалеимиды с более высокой молекулярной массой, например смолы на основе 4,4'-бисмалеимидодифенилметана и 1,4-бисмалеимидо-2-метилбензола. Эти смолы относят к самоотверждающимся [44].

Помимо перечисленного, в составах композиций биндеров встречаются: полицианураты, сложные виниловые эфиры (акрилаты, метакрилаты полиглицидиловых эфиров с молекулярной массой от 800 до 1400) и бензоциклобутеновые смолы [40, 44]; феноксидные смолы [16]; ненасыщенные полиэфирные смолы [40, 44] (продукты реакции фумаровой кислоты и пропоксилированного или этоксилированного бисфенола А, малеинового ангидрида и этоксилированного или пропоксилированного бисфенола А) и др.

В некоторые составы полимерных биндеров входят отвердители [44], в качестве которых чаще всего используют амин, амид, сульфимид, сульфамид, полимеркаптан, полифенол, замещенный имидазол, поликислоту, полиангидрид, мочевины, тиомочевину или сульфонамид. Более предпочтительно, чтобы соединение амина или амида, например дицианамид, использовалось для содействия частичному отверждению. Желательным является применение многостадийных отвердителей, таких как сульфаниламид или цианогуанидин. Многостадийный отвердитель может представлять собой одно соединение или смесь соединений, которые содержат два или более реакционноспособных фрагмента, реагирующих с эпоксидной смолой для отверждения при различных температурах.

В том случае, когда полимерный биндер планируют изготавливать в виде водной дисперсии, в систему добавляют одно или несколько ПАВ, которые служат в качестве диспергирующего или суспендирующего агента [24, 40]. Поверхностно-активные вещества выбирают из анионных, неионогенных ПАВ, их комбинации [24], а иногда и из катионных [40], к которым относятся насыщенные и ненасыщенные карбоновые кислоты или соли карбоновых кислот, сульфатированные алкилфеноксиполи(этиленокси)этанола и их щелочные или аммониевые соли и диалкиловые эфиры щелочной сульфосукциновой кислоты, а также стеариновая кислота и соли щелочных металлов непропорциональной канифоли. Следует помнить, что присутствие ПАВ также способно негативно влиять на физико-механические свойства готового изделия, поэтому его количество должно быть минимальным.

Способы активации полимерных биндеров

Под активацией полимерных биндеров понимают нагревание до плавления, однако без преждевременного отверждения, если состав является термореактивным и включает отвердитель. Как показано ранее, данный факт может негативно повлиять на конечные свойства изделия.

Активация полимерного биндера позволяет многократно изменять форму сухой преформы перед введением связующего.

С целью расплавления полимерного биндера используют различные способы нагрева, такие как термонагрев, лазерная сварка, индукционный нагрев, обработка микроволнами или ультразвуковая сварка и т. д. На рис. 2 представлены основные способы активации полимерных биндеров: передача тепла (основанная на явлении конвекции и кондукции), электромагнитный, электрический и механический способы.

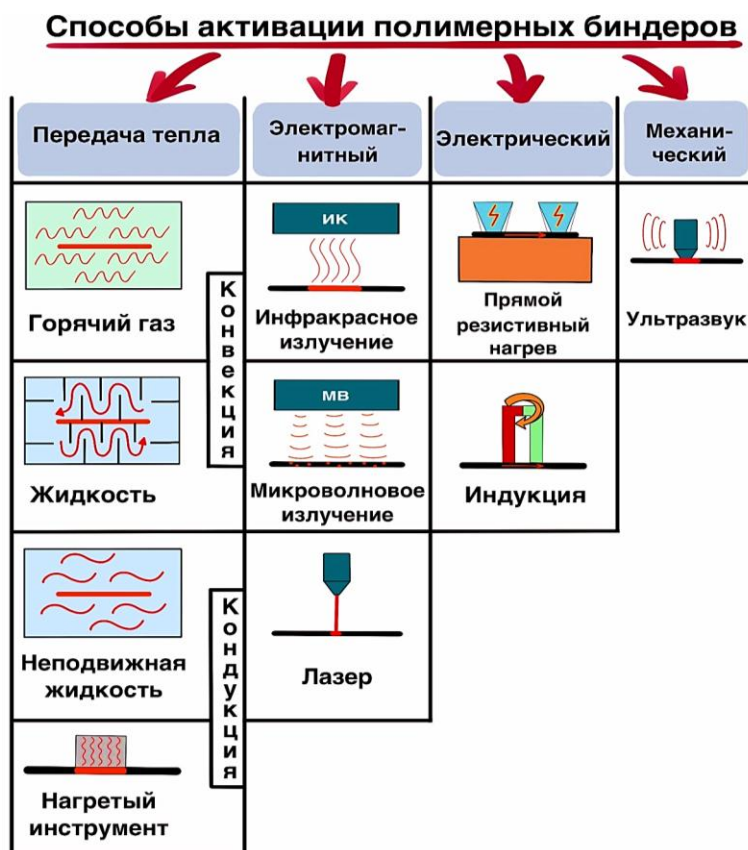


Рис. 2. Способы активации полимерных биндеров

Способ активации подбирают в зависимости от локализации полимерного биндера в преформе. При местном использовании подойдет технология ультразвуковой или лазерной сварки, а индукционный способ, термонагрев или обработку микроволнами эффективнее применять для повсеместной обработки.

Самым распространенным методом активации полимерного биндера считают прямую теплопередачу, например с помощью термошкафа, электрического утюга, саморазогревающейся преформы. Типичные температуры плавления полимерных биндеров находятся в диапазоне от 90 до 130 °С, поэтому требования к приборам для активации сравнительно небольшие.

Лазерная сварка является хорошим альтернативным способом в том случае, когда нет возможности нагреть весь наполнитель либо это делать запрещено. На рынке существует множество инфракрасных нагревателей с уровнями мощности от 60 до 200 кВт/м².

Другим способом для расплавления полимерного биндера является индукционное нагревание, принцип которого заключается в интеграции электродов в преформу с прямым контактом с волокнами. Для данного метода можно использовать углеродные волокна, поскольку они проводят электричество. Для самого процесса нагрева требуется не более нескольких секунд. Однако следует учитывать, что даже в этом случае электрически заряженные волокна представляют собой источник опасности. Индукционное нагревание и как технология активации полимерного биндера, и как метод формовки углеродного наполнителя является новой технологией по сравнению с другими и относится пока к экспериментальным и перспективным способам.

Для активации полимерного биндера также применяют электромагнитные волны в диапазоне от 1 до 300 ГГц. При этом следует учитывать, что не все материалы способны их поглощать. Этот эффект связан с диэлектрическими свойствами полимерного биндера, который чаще всего должен быть полярным, магнитным или электрически проводящим. Преимуществами данного метода можно назвать кратковременность самого процесса и его избирательность нагревания.

Еще одним способом активации является ультразвуковая сварка. Данный способ заключается в том, что под действием высокочастотных механических колебаний происходит молекулярное и поверхностное трение в обрабатываемой области, которое приводит к разогреву. Преимуществами ультразвуковой сварки можно назвать кратковременность самого процесса, контролируемость его мощности воздействия и точность в использовании. В качестве недостатка можно указать то, что сила или амплитуда ультразвука могут повредить наполнитель [45].

Заключения

На основании анализа научной и патентной литературы можно сделать следующие выводы относительно применения полимерных биндеров и эффективного изготовления преформ для производства ПКМ.

В настоящее время массово распространены простые, недорогие и более производительные методы изготовления ПКМ, которые, безусловно, включают использование преформ, получаемых, например, методом автоматизированной выкладки наполнителя. Наиболее эффективное изготовление преформ высокого качества осуществляется за счет стабилизации/фиксации наполнителя с помощью полимерных биндеров.

На рынке доступно множество полимерных биндеров с разным химическим составом, каждый из которых разработан для решения конкретных технологических задач. Например, некоторые полимерные биндеры разработаны не только для процессов фиксации и предварительного формования, но также нацелены на повышение конкретных свойств полимерной матрицы (например, ударной вязкости разрушения).

Существуют многочисленные методы активации полимерных биндеров как локального, так и общего действия. Каждый способ активации имеет свои преимущества и недостатки. Например, некоторые биндерные композиции работают только с электропроводящими волокнами наполнителя, в то время как другие таких ограничений по определенным типам волокон не имеют. Быстрым и энергоэффективным способом локальной активации можно считать ультразвуковую сварку, однако в этом случае требуется определить правильные параметры воздействия, чтобы избежать повреждения наполнителя.

Таким образом, можно сделать вывод, что на практике существует широкий выбор путей активации полимерных биндеров различной природы, что позволяет подобрать под конкретные цели и задачи как сам полимерный биндер, так и оснастку для производства ПКМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Polynt Composites – по-настоящему качественные решения для судостроения // Композитный мир. 2018. № 1. С. 44–47.
3. Паньшин А. Евгений Каблов: доля России на рынке композитов незначительна // Композитный мир. 2019. № 1. С. 22–23.
4. Битюков Ю.И., Денискин Ю.И. Контроль качества конструкций из композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 11. С. 14–19.
5. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
6. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Чуцкова Е.Ю., Мельников Д.А. Отверждение многослойных полимерных композиционных материалов. Часть 2. Формование толстостенной плиты стеклопластика // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 6. С. 7–14.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 42–47.
8. Кудрявцева А.Н., Ткачук А.И., Григорьева К.Н., Гуревич Я.М. Использование связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии, для изготовления низко- и средненагруженных деталей конструкционного назначения // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
9. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние зазоров и нахлестов при выкладке препрегов на механические свойства углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-71-78.
10. Мосиюк В.Н., Томчани О.В. Оценка свойств стеклопластиков на основе эпоксибисмалеимидного связующего, полученных по различным неавтоклавному технологиям формования // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 47–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-47-52.
11. Гусев Ю.А., Григорьев М.М., Тимошина Л.Н. Изготовление эталонных образцов из ПКМ с заданной пористостью методом вакуумной инфузии // Труды ВИАМ. 2014. № 11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-6-6.
12. Мосиюк В.Н., Ворвуль С.В., Томчани О.В. Дифференциальное вакуумное формование как усовершенствованная технология вакуумного формования // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 37–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-37-41.

13. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки: от истоков до наших дней (обзор). Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
14. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Терехов И.В., Донецкий К.И. Термореактивные связующие и полимерные биндеры для полимерных композиционных материалов, получаемых методом вакуумной инфузии (обзор) // *Пластические массы*. 2018. № 1–2. С. 57–64. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-57-64.
15. Lebel L.L., Trudeau P. Preforming of a Fuselage C-shaped Frame Manufacturing by Resin Transfer Molding // *SAE International Journal of Aerospace*. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 508–512. DOI: 10.4271/2013-01-2214.
16. Epoxy resin formulations for textiles, mats and other fibrous reinforcements for composite applications: pat. EP2623561A1; filed 06.02.12; publ. 07.08.13.
17. Toughened binder compositions for use in advance processes: pat. WO2008063611A3; filed 19.11.07; publ. 14.08.08.
18. Binder resin for resin transfer molding preforms, preforms made therewith, and a method for preparing such preforms: pat. US5432010; filed 23.09.94; publ. 11.07.95.
19. Method of fabricating fiber reinforced composite articles by resin transfer molding: pat. US4988469A; filed 16.02.90; publ. 29.01.91.
20. Epoxy composite: pat. GB2460050; filed 14.05.08; publ. 18.11.09.
21. Methods and preforms for forming composite members with interlayers formed of nonwoven, continuous materials: pat. US8246882; filed 27.10.04; publ. 21.08.12.
22. Dry fibrous material for subsequent resin infusion: pat. WO2013096377A3; filed 19.12.12; publ. 27.02.14.
23. Эпоксидное связующее для полимерных композиционных материалов: пат. RU25227086; заявл. 22.11.12; опублик. 27.08.14.
24. Liquid binder composition for binding fibrous materials: pat. US20140179187A1; filed 11.07.13; publ. 26.06.14.
25. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
26. 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: 20.10.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
27. VaRTM Processing of Tackified Fiber/Fabric Composites: pat. US2014120332; filed 21.03.13; publ. 01.05.14.
28. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // *Труды ВИАМ*. 2015. № 3. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
29. Рахматуллин А.Э., Постнов В.И., Стрельников С.В. Опыт создания и применения управляющих программ для проведения процесса формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке // *Труды ВИАМ*. 2019. № 4 (76). Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-48-56.
30. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 686–693.
31. Epoxy film former string binder: pat. US6828024B1; filed 30.06.03; publ. 07.12.04.
32. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.

33. Rohatgi V., Lee L.J. Moldability of Tackified Fiber Preforms in Liquid Composite // *Journal of Composite Materials*. 2018. Vol. 31 (7). P. 720–744. DOI: 10.1177/002199839703100705.
34. Schmidt S., Mahrholz T., Kühn A., Wierach P. Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 2. Investigation of binder effects on the mechanical performance of glass fiber reinforced polymers // *Journal of Composite Materials*. 2017. Vol. 53 (16). P. 2261–2270. DOI: 10.1177/0021998318824784.
35. Preforms for moulding process and resins therefor: pat. WO1998050211A1; filed 30.04.98; publ. 12.11.98.
36. Flexible polymer element as toughening agent in prepregs: pat. EP1317501B1; filed 16.08.01; publ. 22.11.06.
37. Estrada G., Vieux-Pernon C., Advani S.G. Experimental Characterization of the Influence of Tackifier Material on Preform Permeability // *Journal of Composite Materials*. 2020. Vol. 36 (19). P. 2297–2310. DOI: 10.1177/0021998302036019542.
38. Thermally stable binder resin composition and method for binding fibres: pat. EP1341850B2; filed 06.11.01; publ. 14.08.13.
39. Process for producing a reinforcing woven fabric, a preform and a fiber reinforced plastic molded component: pat. US8168106B2; filed 15.12.10; publ. 01.05.12.
40. Method for preparing preforms for molding processes: pat. WO1995032085A1; filed 16.05.95; publ. 30.11.95.
41. Laser-assisted placement of veiled composite material: pat. US2006048881; filed 08.09.04; publ. 09.03.06.
42. Method for making a composite material having at least one twisted thread deposited therein: pat. US8696850; filed 10.06.08; publ. 15.04.14.
43. Thermally stable binder resin composition and method for bonding fibers: pat. JP2004514758A; filed 06.11.01; publ. 20.05.04.
44. Improved process for resin transfer molding: pat. WO1994026492A1; filed 15.04.94; publ. 24.11.94.
45. Heieck F. Binder application methods for textile preforming processes // LTH Faserverbund-Leichtbau. URL: <https://www.researchgate.net> (дата обращения: 22.09.2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.14197.73446.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Tez. Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
2. Polynt Composites - truly high-quality solutions for shipbuilding. *Kompozitnyy mir*, 2018, no. 1, pp. 44–47.
3. Panshin A. Evgeny Kablov: Russia's share in the market of composites is negligible. *Kompozitnyy mir*, 2019, no. 1, pp. 22–23.
4. Bitukov Yu.I., Deniskin Yu.I. Quality control of structures made of composite materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2017, no. 11, pp. 14–19.
5. Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of PCM on CNC machines (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
6. Marakhovsky P.S., Barinov D.Ya., Chutskova E.Yu., Melnikov D.A. Curing of multilayer polymeric composite materials. Part 2. Molding of a thick-walled fiberglass plate. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 6, pp. 7–14.
7. Kablov E.N. Materials of a new generation - the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellect i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14). pp. 42–47.
8. Kudryavtseva A.N., Tkachuk A.I., Grigorieva K.N., Gurevich Ya.M. The use of epoxy resin system VSE-30, processed by the infusion technology, for the manufacture of low and medium loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.

9. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Effect of gaps and overlaps when laying prepregs on the mechanical properties of carbon plastics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-71-78.
10. Mosiyuk V.N., Tomchani O.V. Evaluation of properties of glass-fibre-reinforced plastics based on epoxybismaleimide resin, produced by different non-autoclave molding techniques. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 47–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-47-52.
11. Gusev Yu.A., Grigorev M.M., Timoshina L.N. Production of standard polymer composite samples with the set porosity by vacuum infusion. *Trudy VIAM*, 2014, no. 11, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-6-6.
12. Mosiyuk V.N., Vorvul S.V., Tomchani O.V. Differential vacuum molding as an advanced technology of vacuum molding. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 37–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-37-41.
13. 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 2. Automat-ed Fiber Placement (AFP). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127.
14. Chursova L.V., Panina N.N., Grebeneva T.A., Terekhov I.V., Donetsk K.I. Thermosetting binders and polymer binders for polymer composite materials obtained by vacuum infusion (review). *Plasticheskiye massy*, 2018, no. 1–2. pp. 57–64. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-57-64.
15. Lebel L.L., Trudeau P. Preforming of a Fuselage C-shaped Frame Manufacturing by Resin Transfer Molding. *SAE International Journal of Aerospace*, 2013, vol. 6, no. 2, pp. 508–512. DOI: 10.4271/2013-01-2214.
16. *Epoxy resin formulations for textiles, mats and other fibrous reinforcements for composite applications*: pat. EP2623561A1; filed 06.02.12; publ. 07.08.13.
17. *Toughened binder compositions for use in advance processes*: pat. WO2008063611A3; filed 19.11.07; publ. 14.08.08.
18. *Binder resin for resin transfer molding preforms, preforms made therewith, and a method for preparing such preforms*: pat. US5432010; filed 23.09.94; publ. 11.07.95.
19. *Method of fabricating fiber reinforced composite articles by resin transfer molding*: pat. US4988469A; filed 16.02.90; publ. 29.01.91.
20. *Epoxy composite*: pat. GB2460050; filed 14.05.08; publ. 18.11.09.
21. *Methods and preforms for forming composite members with interlayers formed of nonwoven, continuous materials*: pat. US8246882; filed 27.10.04; publ. 21.08.12.
22. *Dry fibrous material for subsequent resin infusion*: pat. WO2013096377A3; filed 19.12.12; publ. 27.02.14.
23. *Epoxy binder for polymer composite materials*: pat. RU25227086; filed 22.11.12; publ. 27.08.14.
24. *Liquid binder composition for binding fibrous materials*: pat. US20140179187A1; filed 11.07.13; publ. 26.06.14.
25. Timoshkov P.N. Equipment and materials for the technology of automated calculations prepregs. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2016, no. 2 (41), pp. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
26. 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 October 2, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
27. *VaRTM Processing of Tackified Fiber/Fabric Composites*: pat. US2014120332; filed 21.03.13; publ. 01.05.14.
28. Gusev Yu.A., Borshhev A.V., Khrulkov A.V. Features of prepregs intended for automated laying by ATL and AFP technologies. *Trudy VIAM*, 2015, no. 3, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
29. Rakhmatullin A.E., Postnov V.I., Strelnikov S.V. Development and application experience of software for carrying out the formation process of structures from PCM on the heated equipment. *Trudy VIAM*, 2019, no. 4 (76), paper no. 06. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-48-56.

30. Savin S.P. The use of modern polymer composite materials in the airframe design of aircraft of the MS-21 family. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (2). pp. 686–693.
31. *Epoxy film former string binder*: pat. US6828024B1; filed 30.06.03; publ. 07.12.04.
32. Veshkin E.A. *Technologies of autoclave-free molding of low-porous polymer composite materials and large-sized structures from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016. 146 p.
33. Rohatgi V., Lee L.J. Moldability of Tackified Fiber Preforms in Liquid Composite. *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 31 (7), pp. 720–744. DOI: 10.1177/002199839703100705.
34. Schmidt S., Mahrholz T., Kühn A., Wierach P. Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 2. Investigation of binder effects on the mechanical performance of glass fiber reinforced polymers. *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 53 (16), pp. 2261–2270. DOI: 10.1177/0021998318824784.
35. *Preforms for moulding process and resins therefor*: pat. WO1998050211A1; filed 30.04.98; publ. 12.11.98.
36. *Flexible polymer element as toughening agent in prepregs*: pat. EP1317501B1; filed 16.08.01; publ. 22.11.06.
37. Estrada G., Vieux-Pernon C., Advani S.G. Experimental Characterization of the Influence of Tackifier Material on Preform Permeability. *Journal of Composite Materials*, 2020, vol. 36 (19), pp. 2297–2310. DOI: 10.1177/0021998302036019542.
38. *Thermally stable binder resin composition and method for binding fibres*: pat. EP1341850B2; filed 06.11.01; publ. 14.08.13.
39. *Process for producing a reinforcing woven fabric, a preform and a fiber reinforced plastic molded component*: pat. US8168106B2; filed 15.12.10; publ. 01.05.12.
40. *Method for preparing preforms for molding processes*: pat. WO1995032085A1; filed 16.05.95; publ. 30.11.95.
41. *Laser-assisted placement of veiled composite material*: pat. US2006048881; filed 08.09.04; publ. 09.03.06.
42. *Method for making a composite material having at least one twisted thread deposited therein*: pat. US8696850; filed 10.06.08; publ. 15.04.14.
43. *Thermally stable binder resin composition and method for bonding fibers*: pat. JP2004514758A; filed 06.11.01; publ. 20.05.04.
44. *Improved process for resin transfer molding*: pat. WO1994026492A1; filed 15.04.94; publ. 24.11.94.
45. Heieck F. Binder application methods for textile preforming processes. *LTH Faserverbund-Leichtbau*. Available at: <https://www.researchgate.net> (accessed: September 22, 2021). DOI: 10.13140/RG.2.2.14197.73446.

Информация об авторах

Афанасьева Евгения Александровна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ширякина Юлия Михайловна, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Китаева Наталья Сергеевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Новикова Александра Андреевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgenia A. Afanaseva, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Yulia M. Shiriakina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia S. Kitaeva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandra A. Novikova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.12.2021.
The article was submitted 06.12.2021; approved and accepted for publication after reviewing 13.12.2021.