

УДК 678.8

Е.Д. Колпачков¹, А.П. Петрова¹, А.О. Курносов¹, И.И. Соколов¹

МЕТОДЫ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ ПКМ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-22-36

Представлены основные методы формования изделий авиационного назначения из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Для анализа представленных методов предложена классификация, которая основана на принципе разделения на препреговые, безпрепреговые и прочие методы. Проанализированы отличительные особенности данных методов, рассмотрены основные технологические параметры, представлены схемы проведения процессов, а также схемы формующего оборудования, приведены основные преимущества и недостатки.

Ключевые слова: ПКМ, изделия авиационного назначения, методы переработки ПКМ, композиционные материалы.

E.D. Kolpachkov¹, A.P. Petrova¹, A.O. Kurnosov¹, I.I. Sokolov¹

METHODS OF MOLDING AVIATION PRODUCTS FROM PCM (review)

This paper presents the basic methods of molding aviation products from polymer composite materials (PCM). For the analysis of the presented methods, a classification is proposed, which is based on the principle of separation into prepreg, non-prepreg, and other methods. The distinctive features of these methods are analyzed, the main technological parameters are considered, the process flow diagrams are presented, as well as the molding equipment circuits, the main advantages and disadvantages are given.

Keywords: PCM, product aviation purpose, methods of processing of polymer PCM, composite materials.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Новые требования, предъявляемые к технологическим и эксплуатационным характеристикам материалов, используемых в технике авиационного назначения, заставляют инженеров-технологов и материаловедов искать новые нетривиальные подходы к созданию технологий изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–4]. Первый патент на полимерный материал, упрочненный волокнистым наполнителем, был выдан в 1909 г. и защищал интеллектуальную собственность в части, касающейся введения хлопчатобумажной ткани в качестве армирующего наполнителя в фенолформальдегидные смолы. Но наука и техника развивались, и уже в 1935 г. были запатентованы ПКМ на основе стекловолокон. Спустя два десятилетия было обнаружено, что материалы, имеющие в составе надмолекулярной структуры кристаллы игольчатой формы, имеют чрезвычайно высокую прочность – более 10000 МПа, на основании этого были получены первые угольные и борные волокна для армирования полимерных материалов [5]. В настоящее время перечень материалов – таких как связующие,

наполнители, адгезионные агенты, функциональные добавки и др. – многообразен и при правильном сочетании позволяет создавать неметаллические материалы с разнообразным набором характеристик.

Однако на данном этапе возникают проблемы, решение которых находится не в области принципов создания ПКМ, а именно в сфере технологии производства. Это обусловлено тем, что не все материалы, способные демонстрировать определенный набор параметров, могут перерабатываться по одной и той же технологии. Это проявляется в совокупности технологических свойств исходных компонентов, которые входят в состав полимерных материалов. Под этими свойствами в данном случае могут подразумеваться вязкость связующего при температуре формования, температура отверждения, время гелеобразования и др. Например, с помощью одних способов формования невозможно создать необходимое давление в системе питания для перекачки связующего в необходимом количестве или конфигурация оснастки не позволяет создать оптимальный температурный профиль для наиболее эффективного протекания отверждения.

В данную проблему вносит свой вклад также тот факт, что некоторые процессы переработки неметаллических материалов не могут удовлетворить требований к конечному продукту. В качестве примера можно привести технологию пропитки под давлением RTM (Resin Transfer Moulding) и ее производную VARTM (Vacuum Assisted), в последнем случае для уменьшения пористости изделия непосредственно перед введением связующего осуществляют вакуумирование для удаления воздуха.

Следует отметить также такую важную составляющую проблематики при формовании изделий из ПКМ, как продолжительность процесса и его трудоемкость. В качестве примера можно привести разновидность способа пропитки под давлением. Для решения проблемы снижения длительности технологического цикла пропитки и увеличения производительности разработан способ SMRIM (Sequential Multiport Resin Injection Molding) [6]. Основные отличия заключаются в применении многоточечного впрыска связующего и автоматизации этой операции, что в конечном счете позволило снизить продолжительность пропитки с 1 ч до 6 мин [6].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что при постановке задачи создания новых агрегатов и узлов из неметаллических материалов всегда возникают вопросы: «Из чего делать?» и «Как делать?». В результате ответы на эти вопросы явились толчком для развития неметаллического материаловедения и технологии производства ПКМ авиационного назначения.

Классификация методов формования изделий из ПКМ

В настоящее время методы формования изделий авиационного назначения из ПКМ можно разделить на препреговые и безпрепреговые (или прямые процессы – Direct Process) [7].

Особенностью первых является то, что перед формованием непосредственно самого изделия требуется трудо- и энергозатратный технологический процесс получения полуфабриката препрега – тканого или нетканого наполнителя, пропитанного связующим. На втором этапе полученный препрег раскраивается под необходимые размеры, выкладывается в оснастку и затем формуется. К данному способу переработки можно отнести прессование и автоклавное формование [8].

При использовании безпрепреговой технологии стадии совмещения наполнителя и связующего, а также формования происходят за одну технологическую операцию, что по сравнению с препреговой технологией наиболее эффективно с точки зрения энерго- и трудозатрат. К данному методу можно отнести следующие технологии формования: RFI, RTM и инфузию [9].

Препреговые технологии формования

Прессование

Прессование является одним из старейших методов формования реактопластов и остается актуальным до настоящего времени [10]. Для изготовления изделий авиационного назначения, как правило, применяется метод прямого горячего прессования. Суть метода заключается в следующем: предварительно изготовленный препрег раскраивается под параметры формуемого изделия, выкладывается в формующую оснастку и исполнительный механизм метода прессования (пуансон) воздействует на материал, расположенный в оснастке, в результате чего происходит формование [7]. После придания формы изделию необходимо отвердить. Для этого используется формующая оснастка с обогревом. На рис. 1 представлена фотография гидравлического вулканизационного пресса, используемого для формования изделий из ПКМ во ФГУП «ВИАМ».



Рис. 1. Гидравлический вулканизационный пресс

К технологическим параметрам процесса можно отнести температуру формования, давление прессования и продолжительность выдержки под давлением.

Температура процесса в первую очередь зависит от температуры, при которой связующее переходит в вязкотекучее состояние, и конечной температуры отверждения связующего. В связи с этим процесс формования может протекать при постоянной температуре или по ступенчатой схеме; то же самое касается и давления прессования – в зависимости от характеристик связующего процесс может проходить при постоянном давлении или с периодическим изменением в процессе прессования. Следует также отметить, что для получения низкой пористости материала необходимо применение цикла подпрессовки для удаления летучих компонентов, выделяющихся из исходной композиции, и газообразных продуктов реакции.

Продолжительность выдержки под давлением оказывает влияние на свойства конечного продукта [11], так как после выкладки формуемого пакета в оснастку, его обогрева и воздействия давления связующее переходит из высоковязкого состояния в низковязкое, а затем вследствие воздействия температуры отверждается. В связи с изменениями физических состояний связующего необходимо, чтобы претерпевая все эти состояния, материал находился под давлением прессования в течение оптимального для этого материала времени. Соблюдение этого условия позволяет получать изделия с высокой точностью линейных размеров и равномерным распределением свойств по объему изделия. Следует также отметить, что для наиболее точной оценки продолжительности выдержки под давлением необходимо учитывать такие технологические параметры исходных компонентов, как вязкость связующего (η) и коэффициент проницаемости

армирующего наполнителя. Вязкость связующего – величина, зависящая от температуры, в связи с чем необходимо учитывать этот факт при расчете продолжительности выдержки под давлением. В свою очередь, коэффициент проницаемости зависит от текстильной структуры армирующего наполнителя и необходимо учитывать, что его величина будет изменяться в зависимости от используемого количества слоев волокнистого материала. После процесса отверждения связующего необходимо выдержать некоторое время изделие в закрытой оснастке под давлением для релаксации внутренних напряжений и фиксации формы изделия.

В настоящее время в качестве примеров изделий авиационного назначения, изготовленных методом прессования, можно привести обшивки хвостовых отсеков лопастей несущих винтов вертолетов, а также радиопрозрачные обтекатели различных летательных аппаратов.

К достоинствам данного метода можно отнести:

- относительную простоту технологического процесса;
- небольшое количество инструмента и расходных элементов, а также относительно невысокую стоимость оборудования в сравнении с конкурирующими технологиями.

К недостаткам данного метода можно отнести:

- низкую производительность процесса;
- ограничения по ассортименту изготавливаемых изделий в связи со сложностью формования узлов и агрегатов с многопрофильной поверхностью.

Автоклавное формование

Для получения изделий с высокими физико-механическими характеристиками, высокой точностью линейных размеров и сложным профилем поверхности наиболее часто применяется метод автоклавного формования [12]. Несмотря на то что автоклавный метод позволяет получать изделия со сложной конфигурацией, линейные размеры конечного продукта зависят от доступного внутреннего рабочего объема автоклава.

Суть метода автоклавного формования заключается в выкладке предварительно раскроенного препрега в форму, которую затем помещают в вакуумный мешок и откачивают воздух. За счет вакуумирования мешка с препрегом происходит частичное удаление летучих компонентов и воздушных включений, что обеспечивает низкую пористость получаемого изделия и равномерность его свойств в объеме. Далее вакуумированный мешок с формующей оснасткой подается во внутреннее пространство автоклава. При сохранении разрежения внутри вакуумного мешка в рабочем пространстве автоклава создается избыточное давление (до 3,0 МПа) и повышенная температура (до 380°C) [10]. Необходимо отметить, что для формования изделий при температуре >180°C целесообразно применять азот вместо воздуха для предотвращения возгорания. На рис. 2 представлена фотография автоклава, используемого для формования изделий из ПКМ во ФГУП «ВИАМ».



Рис. 2. Автоклав для формования изделий из ПКМ

Из основных технологических параметров в данном случае можно выделить давление и температуру формования. Что касается температуры, то она определена природой связующего и должна во время цикла формования соответствовать температуре отверждения связующего. Давление должно определяться исходя из требований к конечному продукту, а также из качественного и количественного состава формируемых компонентов, которые напрямую влияют на вязкость, скорость пропитки связующим и др. [13, 14].

Формующая оснастка состоит из двух составляющих: нижней части, которая представляет собой металлическую или композитную оправку, которая способна задавать геометрическую форму, и верхней, которая является совокупностью слоев различных функциональных полимерных пленок, непосредственно формируемой заготовки и, если это необходимо, цулаг из металла или композита. Под функциональными пленками в данном случае подразумевается совокупность теплоизолирующих, герметизирующих, впитывающих, дренажных и антиадгезионных (разделительных) слоев [15]. Все эти слои подбираются исходя из условия, что они должны сохранять способность выполнять свои функции при условиях формования: давлении, температуре и продолжительности. На рис. 3 представлены фотографии процесса выкладки ленты препрега [15].



Рис. 3. Роботизированный комплекс Coriolis Composites для автоматизированной выкладки углеволокна [15]

Если говорить о примерах изделий, изготавливаемых автоклавным формованием, применяемых в авиации, то в настоящее время одним из наиболее показательных примеров является изготовление элементов механизации крыла самолета МС-21.

К достоинствам данного метода можно отнести возможность создавать высокое и равномерное давление на изготавливаемое изделие, что позволяет получать изделия из ПКМ с равномерным распределением свойств в объеме материала, а к недостаткам – высокие трудо- и энергозатраты, высокую стоимость оборудования, большое количество расходных материалов, а также их высокую стоимость, что неприемлемо в масштабах мелкосерийного производства.

Методы автоматизированной выкладки ленты (ATL) и автоматизированной выкладки волокон (AFP)

Как рассматривалось ранее, при автоклавном методе формования на формующую оснастку вручную выкладывали слои раскроенного препрега. Применение ручного труда повышает риск наличия брака в конечном продукте и значительно снижает производительность процесса в связи с увеличением использования ручного труда. Наличие ручного труда также затрудняет производство крупногабаритных изделий из ПКМ.

Для решения этой задачи при использовании современного научно-технического потенциала в области машиностроения и программирования разработаны технологии автоматизированной выкладки ленты ATL (Automated Tape Laying) и автоматизированной выкладки волокон AFP (Automated Fiber Placement) [15]. Использование данных технологий позволило повысить качество получаемых изделий, значительно снизить трудоемкость процесса производства и повысить воспроизводимость процесса.

Суть обоих методов заключается в том, что на формующую оснастку происходит выкладка роботом ленты препрега (ATL) или пропитанных волокон (AFP). После окончания процесса формующую оснастку с уложенным в ней препрегом отправляют в автоклав для отверждения связующего и конечной фиксации формы изделия.

Возможность применения данных технологий зависит от геометрических параметров конечного изделия [16]. Если необходимо отформовать крупногабаритное изделие с простой геометрической формой поверхности, то наиболее подходящим способом будет выкладка ленты, так как это способствует значительному росту производительности (рис. 4). Если необходимо отформовать изделие со сложной геометрической формой поверхности, то оптимальным будет являться метод выкладки волокон, так как за счет меньшей выкладываемой площади поверхности будет минимизироваться вероятность образования складок и замятий.



Рис. 4. Упрощенная схема процесса автоматизированной выкладки ленты [17]

Поскольку при использовании данных технологий главным фактором является прилипание препрега к оснастке, то к основным технологическим параметрам процесса можно отнести скорость выкладки, температуру и силу прижима. Все эти параметры напрямую связаны со свойствами препрега, а именно – свойствами связующего, которое должно отвечать требованиям по липкости. Соответственно, набор технологических параметров должен подбираться, исходя из природы связующего, так, чтобы поддерживать оптимальную липкость в процессе формования [18].

Что касается непосредственно изделий авиационного назначения, то методом ATL изготавливают панель кессона-киля самолета МС-21, по технологии AFP – корпус воздухозаборника двигателя ПД-14. Данную технологию также используют при формовании крыла самолета МС-21.

К достоинствам данного метода можно отнести:

- повышение производительности труда;
- снижение трудоемкости процесса;
- повышение качества изделий.

К недостаткам метода можно отнести:

- высокую стоимость оборудования;
- техническую сложность оборудования;
- высокий уровень требований, предъявляемых к используемому связующему, для достижения оптимального уровня липкости.

Безпрепеговые технологии формования

Инфузия (технология VARTM)

Одним из наиболее часто используемых прямых методов (Direct Process) [7] формования изделий из ПКМ является инфузия или вакуумная инфузия (технология VARTM). В основе метода лежит процесс пропитки армирующего наполнителя связующим, движущимся за счет разницы давления. Эту разницу давлений обеспечивает разрежение, создаваемое в вакуумном мешке, в котором находятся формирующая оснастка и наполнитель, с помощью вакуумного насоса. В результате возникновения градиента давлений связующее из емкости поступает в формирующую полость и равномерно пропитывает находящийся там сухой армирующий материал.

Если сравнивать данный метод с контактными методами формования, то следует отметить более высокое качество изделий вследствие меньшей пористости и равномерного содержания связующего по объему ПКМ благодаря наличию более легко контролируемых технологических параметров процесса.

Сам технологический процесс состоит из нескольких стадий: выкладка на формирующую полость сухого армирующего наполнителя, а на него специальной сетки, обеспечивающей равномерное движение связующего внутри вакуумного пакета [19]. В формовочном пакете может присутствовать также разделительная ткань, отделяющая формирующую часть наполнителя и связующего от самой оснастки, но при определенных требованиях она может быть заменена на антиадгезионную смазку, которой предварительно промазывают формирующую оснастку. Затем, когда связующее полностью пропитало наполнитель, начинается этап отверждения связующего. Однако в связи с конструктивными особенностями оснастки невозможно обеспечить равномерный обогрев всего изделия, поэтому для обеспечения температуры отверждения термореактивной смолы формообразующую полость с наполнителем, упакованную в вакуумный мешок, до процесса пропитки помещают в тепловой шкаф. На рис. 5 представлена технологическая схема процесса вакуумной инфузии [20].

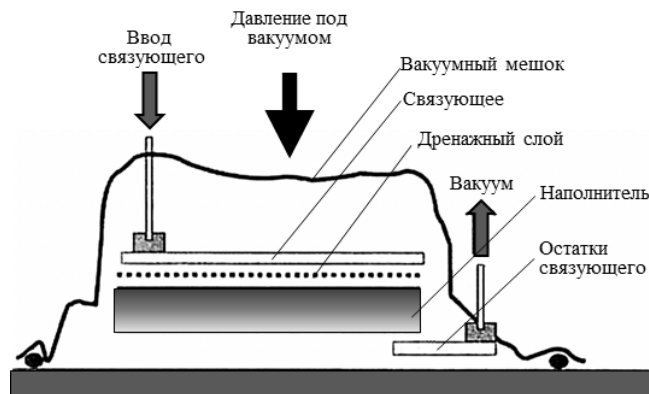


Рис. 5. Схема процесса изготовления изделий из ПКМ методом вакуумной инфузии (технология VARTM) [20]

Основными технологическими параметрами процесса являются температура и продолжительность пропитки. Как упоминалось ранее, температура процесса зависит от свойств используемого связующего и, соответственно, выбирается исходя из условий отверждения смолы. Продолжительность процесса зависит от совокупности характеристик используемых компонентов – вязкости связующего и проницаемости используемого наполнителя [20]. На рис. 6 представлена типовая схема укладки слоев в формовочном пакете для процесса вакуумной инфузии [21].

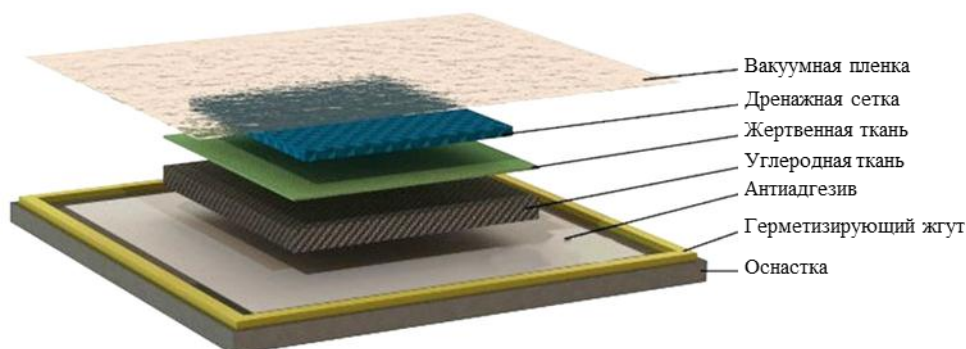


Рис. 6. Схема укладки слоев для формирования методом инфузии (технология VARTM) [21]

Предварительно оценить продолжительность процесса пропитки возможно при использовании закона Дарси [20]:

$$\bar{w}_x = \frac{-k}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} + \rho_{св} \bar{g} \right),$$

где k – эффективная проницаемость наполнителя, м^2 ; μ – динамическая вязкость связующего, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\rho_{св}$ – плотность связующего, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – вектор ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}$; p – давление, Па .

Вакуумная инфузия в целом не используется для изготовления конструктивных изделий авиационного назначения, которые должны работать при высоких нагрузках. Однако при изготовлении «черного» крыла для самолета МС-21 использована доработанная технология инфузии, т. е. VAP-процесс (Vacuum Assisted Process) формирования изделий из ПКМ, основанный на вакуумной инфузии, но с использованием полупроницаемой мембраны [22]. Данная мембрана позволяет улучшать качество готового изделия за счет значительного уменьшения вероятности образования зон армирующего наполнителя, непропитанных связующим до 0,2%, и, помимо этого, за счет создания равномерно распределенного давления, позволяющего снижать разнотолщинность изделий [22]. На рис. 7 изображена технологическая схема процесса вакуумной инфузии с использованием полупроницаемой мембраны [23].



Рис. 7. Схема изготовления детали методом вакуумной инфузии с использованием полупроницаемой мембраны [23]

По сравнению с другими методами формования к достоинствам данного метода можно отнести то, что, поскольку формование происходит не в форме типа «пуансон/матрица», а в формующей полости с закрепленным на ней вакуумным мешком, не требуется разработки дорогостоящей оснастки, а также, поскольку связующее поступает за счет разрежения, не требуется специализированного оборудования для создания избыточного давления. В связи с этим данная технология значительно более экономически выгодна, чем автоклавное формование.

Недостатком данного метода является низкая точность воспроизведения геометрических размеров и физико-механических характеристик из-за формования не в закрытой форме, а под вакуумным мешком.

Пропитка под давлением (RTM)

Одной из разновидностей прямых процессов формования является пропитка под давлением RTM [7]. Суть метода заключается в выкладке сухого армирующего наполнителя на формующую полость, сборке и герметизации оснастки и подаче связующего под давлением в форму. Процесс пропитки продолжается до тех пор, пока связующее полностью не заполнит рабочее формообразующее пространство. Зафиксировать окончание данного этапа можно по наличию сплошного потока термореактивного связующего (без включения газовой фазы) в дренажной системе оснастки. Необходимо отметить, что возможно использование термореактивных композиций «холодного» отверждения [24].

Определяющим различием между методами RTM и его разновидностью VARTM является движущая сила процесса. В пропитке под давлением, как следует из названия, связующее движется за счет избыточного давления, создаваемого компрессором. При использовании метода VARTM связующее транспортируется в форму за счет создания в оснастке разрежения. Помимо этого, при использовании последнего метода не требуется оснастка по типу «пуансон/матрица» и вместо верхней жесткой плиты используется вакуумный мешок. На рис. 8 представлена технологическая схема процесса пропитки под давлением [25].

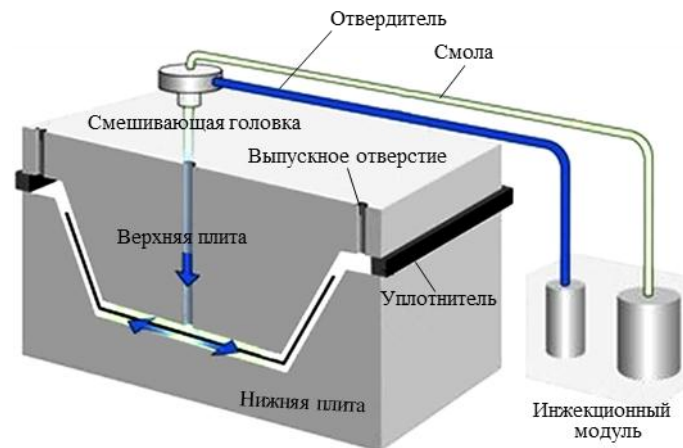


Рис. 8. Схема процесса получения изделий из ПКМ методом пропитки под давлением (RTM) [25]

К основным технологическим параметрам процесса можно отнести температурный режим, который регламентируется температурой отверждения связующего. Одним из ключевых параметров процесса также является давление подачи связующего. Оно, в свою очередь, так же как и в случае инфузионного формования, связано с проницаемостью наполнителя и вязкостью термореактивной композиции и оценивается по уравнению Дарси – см. формулу [20].

Общими достоинствами процесса являются:

- отсутствие необходимости использования дорогостоящего оборудования, как и в случае инфузии;
- возможность изготовления деталей со сложной конфигурацией поверхности;
- возможность пропитки мультиаксиальных армирующих наполнителей.

Недостатками процесса являются:

- относительная длительность процесса;
- зависимость качества конечного продукта от расположения трубок дренажной системы;
- в некоторых случаях высокая стоимость оснастки, связанная с ее конструктивной сложностью.

Пропитка пленочным связующим (RFI)

Одним из распространенных прямых методов формования изделий из ПКМ авиационного назначения является метод пропитки пленочным связующим RFI (Resin Film Infusion) [7]. Основным отличием от описанных ранее методов является то, что связующее не требуется подавать в формующую полость за счет разницы давлений, поскольку оно уже присутствует в технологическом пакете в виде пленки [26]. Еще одной особенностью данного метода также является поперечное направление движения терморезактивной композиции, в отличие от методов инфузии и пропитки под давлением, в которых из-за особенностей системы подачи связующего оно распространяется в продольном направлении, проделывая больший путь, тем самым увеличивая продолжительность процесса пропитки армирующего наполнителя [26–28].

Суть метода пропитки пленочным связующим заключается в следующем:

- на формующую полость выкладываются слои предварительно раскроенного наполнителя и терморезактивной композиции в виде пленки;
- подготавливается технологический пакет;
- в зависимости от требований к конечному продукту проводится формование либо в условиях разрежения в печи, либо при избыточном давлении в автоклаве. На рис. 9 изображена схема процесса пропитки пленочным связующим [26].

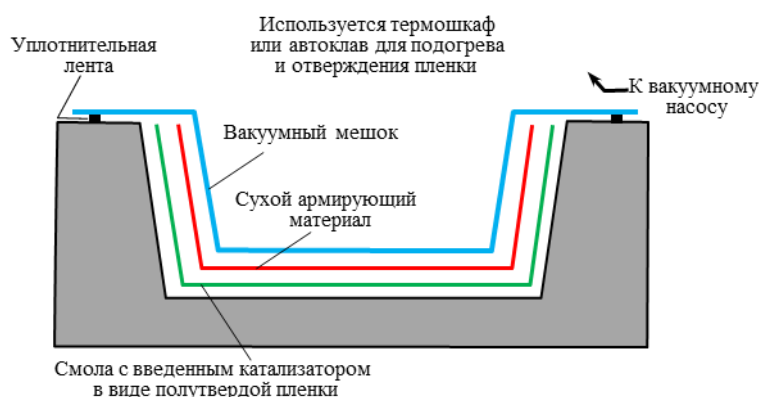


Рис. 9. Схема процесса получения изделий из ПКМ методом пропитки пленочным связующим [26]

Как и в случае с другими прямыми процессами формования, технологические параметры зависят от характеристик используемого связующего. Температура процесса пропитки зависит от реологических характеристик связующего, а температурный режим процесса формования – от температуры отверждения терморезактивной композиции. Что касается продолжительности этапа пропитки, то данный параметр зависит от

реологических характеристик связующего, а также от структуры армирующего наполнителя. Оценить данный параметр представляется возможным по уравнению Дарси – см. формулу [20].

К достоинствам данного метода можно отнести возможность создавать изделия с точно заданным количеством связующего, что позволяет давать более точный прогноз по физико-механическим характеристикам получаемого продукта.

Недостатком метода RFI является строго определенные требования по реологическим характеристикам связующего, что продиктовано затрудненной проницаемостью связующим армирующими наполнителями в трансверсальном направлении, при этом терморезактивная композиция при стандартных условиях должна обладать повышенным значением вязкости для использования в качестве пленки.

Другие методы формования

В рамках рассмотрения методов формования изделий авиационного назначения из ПКМ необходимо отметить методы, однозначно не относящиеся к препреговым или безпрепреговым, а также методы формования изделий из ПКМ, которые из-за своих технологических особенностей не подходят для создания высоконагруженных конструктивных узлов и агрегатов авиационного назначения.

Намотка

Одним из методов формования изделий из ПКМ, в котором могут использоваться как заранее пропитанные связующим армирующие наполнители, так и непропитанные волокнистые наполнители, является намотка. Одной из отличительных особенностей данного метода является то, что форма конечного продукта определяется вращением произвольной образующей. Суть данного метода заключается в том, что армирующий наполнитель наматывается на вращающуюся оправку, которая определяет внутреннюю геометрическую форму получаемого изделия.

По типу совмещения наполнителя со связующим можно выделить намотку двух типов: «мокрую» и «сухую» [29].

Особенностью «мокрой» намотки является то, что армирующий материал совмещается со связующим непосредственно перед укладкой на формирующую оправку. На рис. 10 представлена фотография процесса намотки лопасти [29].



Рис. 10. Намотка лопасти [29]

При использовании «мокрой» намотки обеспечивается лучшая формуемость изделий, в связи с этим целесообразно применять данный метод для формования крупногабаритных тел вращения и сосудов, работающих под высоким давлением.

«Сухая» намотка подразумевает использование предварительно пропитанного связующим наполнителя – препрега. Это позволяет обеспечивать заданное содержание связующего, что, в свою очередь, обеспечивает стабильность физико-механических

характеристик изделия. Коэффициент трения при «сухой» намотке в 2 раза выше, чем при «мокрой», что делает возможным изготовление детали со сложной конфигурацией поверхности данным методом [30, 31].

После укладки армирующего наполнителя на формующую оправку до набора необходимой толщины оснастка отправляется в тепловую камеру для отверждения связующего и фиксации формы изделия.

Еще одной особенностью процесса намотки является наличие формующей оснастки. Оправка, на которую наматывается наполнитель, должна сохранять свою функцию, т. е. сохранять конфигурацию внутренней поверхности изделия под действием силовых и температурных воздействий в процессе намотки и отверждения. В настоящее время используют разборные, неразборные, выплавляемые, разрушаемые, надувные, выжигаемые и комбинированные оправки [32].

К технологическим параметрам метода намотки можно в первую очередь отнести непосредственно схему намотки. Под этим подразумевается рисунок укладки армирующего наполнителя, исходя из этого метод подразделяют на поперечную (кольцевую), продольную (осевую), продольно-поперечную и спиральную намотки. Среди технологических параметров также можно отметить температуру процесса, которая зависит от используемого связующего и регулирует его способность к формованию в процессе укладки наполнителя. Еще одним немаловажным параметром является усилие натяжения при укладке наполнителя, оптимальный подбор которого снижает риск образования складок, замятий или нарушения рисунка укладки.

К преимуществам данного метода можно отнести:

- высокую производительность процесса, обусловленную высокой скоростью укладки наполнителя;
- возможность формования крупногабаритных изделий, образованных телами вращения.

К недостаткам данного метода можно отнести:

- ограниченный перечень изделий, которые можно изготовить таким методом;
- высокую стоимость оборудования.

Методы контактного формования

Более простыми по аппаратно-технологическому оформлению по сравнению с рассмотренными ранее методами формования являются методы контактного формования. В основе данных методов лежит укладка наполнителя, пропитанного связующим, с использованием технологии ручной выкладки. При использовании технологии напыления в открытую форму укладывается раскроенный армирующий наполнитель, на который затем наносится связующее путем распыления [33]. На рис. 11 изображена технологическая схема процесса формования изделий из ПКМ методом ручной выкладки [34].

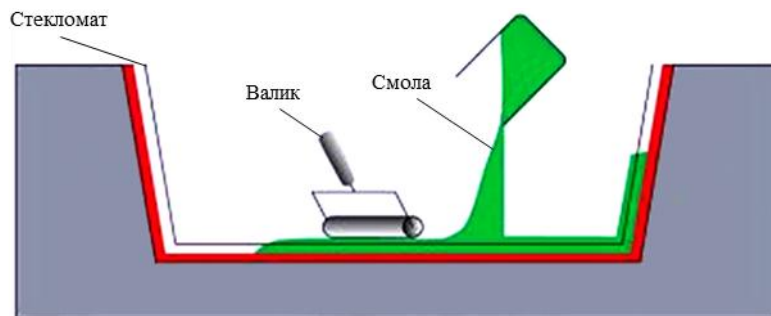


Рис. 11. Схема процесса ручной выкладки [34]

Отличительной особенностью процесса является то, что поверх разделительной пленки, которая впоследствии будет разделять отформованное изделие и форму, наносится наружный смоляной слой (гелькоут), в состав которого входит связующее и пигменты. По своей функции гелькоут формирует наружную поверхность изделия и в дальнейшем служит для защиты от воздействия климатических факторов и придания декоративных функций изделию. После нанесения наружного смоляного слоя в форму укладывают слои армирующего наполнителя (либо предварительно пропитанного связующим, либо пропитка происходит уже в форме), после чего выложенный формовочный пакет прикатывают роликом [33].

Вторым наиболее распространенным методом формования изделий из ПКМ является метод напыления. По сравнению с методом ручной выкладки он имеет отличительную особенность – наполнитель представляет собой рубленый ровинг, который дозируют вместе со связующим непосредственно в форму, после чего выложенную композицию прикатывают роликом для более равномерного распределения термореактивной смолы и удаления воздушных полостей [33]. На рис. 12 представлена фотография процесса формования корпуса лодки методом напыления [35].



Рис. 12. Формование корпуса лодки методом напыления [35]

Перечень технологических параметров строго не регламентирован и зависит от используемого связующего и требований к конечному продукту.

К преимуществам данных методов формования можно отнести:

- универсальность, заключающуюся в возможности получения изделий различных форм и размеров;
- низкую стоимость аппаратного оснащения.

К недостаткам методов можно отнести:

- отсутствие возможности точного контроля за характеристиками формирующегося изделия (содержание связующего, наличие воздушных полостей и др.);
- высокую трудоемкость;
- значительное использование ручного труда.

Заключения

На основании рассмотренных методов формования изделий из ПКМ невозможно дать однозначную оценку – какому из представленных методов отдать предпочтение, поскольку среди них отсутствуют универсальные. Подбирать наиболее оптимальный метод формования изделий из ПКМ необходимо исходя из требований к конечному продукту и наличия ресурсов.

Следует отметить, что специалистами ФГУП «ВИАМ» разработаны ПКМ, которые могут серийно изготавливаться с использованием рассмотренных методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
5. Бычков Р.А. Физика и химия материалов покрытий: учеб.-метод. пособие. М.: МГАПИ, 2004. 268 с.
6. Джоган О.М., Костенко О.П. Методы пропитки под давлением // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2011. №4. С. 111–125.
7. Коган Д.И. Технология изготовления полимерных композиционных материалов способом пропитки пленочными связующими: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2011. 139 с.
8. Каллистер У., Ритвич Д. Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамика, полимеры). СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 896 с.
9. Балакирев В.С., Заев А.В., Большаков А.А. и др. Автоматизированные производства изделий из композиционных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.
10. Тростянская Е.Б., Головкин Г.С., Дмитренко В.П. и др. Перспективные ПКМ и прогрессивные технологии производства из них элементов конструкции ЛА // Авиационная промышленность. 1987. №2. С. 37–42.
11. Братухин А.Г., Боголюбов В.С., Сироткин О.С. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении. М.: Готика, 2003. 516 с.
12. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
13. Колосов А.Е., Репелис И.А., Хозин В.Г., Клявин В.В. Пропитка волокнистых наполнителей полимерным связующим // Механика композитных материалов. 1988. №3. С. 490–496.
14. Fisher K. Autoclave quality outside the autoclave? // High-Performance Composites. 2006. Vol. 21. No. 2. P. 14–23.
15. MC-21 – лайнер с «черным» крылом // Авиация России: интернет-портал [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aviation21.ru> (дата обращения: 18.10.2019).
16. Нелюб В.А., Гращенков Д.В., Коган Д.И., Соколов И.А. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков // Химическая технология. 2012. №12. С. 735–739.
17. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
18. Sloan J. ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures // High Performance Composites. 2008. Vol. 22. No. 6. P. 20–25.
19. Комаров В.А., Куркин Е.И., Кузнецов А.С. Исследование и модификация оснастки и формообразующей поверхности с целью повышения точности изготовления деталей методом вакуумной инфузии // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. №6 (3). URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 05.11.2019).

20. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. и др. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 18–26.
21. Метод вакуумной инфузии и области ее применения. Установки вакуумной инфузии // *Оборудование для создания и поддержания вакуума. Лабораторные и промышленные вакуумные системы и термическое оборудование [Электронный ресурс]*. URL: <http://www.uksim-oz.ru> (дата обращения: 18.10.2019).
22. Vacuum injection process for manufacturing fiber reinforced composite products involves evacuating second chamber causing resin to flow into preform in adjacent evacuated first chamber: pat. 10013409 DE; filed 17.03.00; publ. 23.11.00.
23. Иванов М.С., Нестерова Т.А., Платонов М.М. Полупроницаемые мембраны для процесса вакуумной инфузии ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №2 (50). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-7-7.
24. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Коган Д.И., Попов Ю.О. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением // *Тез. докл. Межотрасл. науч.-техн. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении»*. М., 2009. С. 22–25.
25. Технологии // Компания «Современные полимерные технологии»: офиц. сайт. URL: <http://www.apotech.ru> (дата обращения: 18.10.2019).
26. Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV: Материалы для авиакосмической техники. С. 63–67.
27. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-9.
28. Rudd C.D., Long A.C., Kendall K.N., Mangin C.G.E. *Liquid Moulding Technologies*. Woodhead Publishing and SAE International, 1997. P. 42–57.
29. Использование композитов в ветроэнергетике // *Экспериментальный завод композитных материалов: офиц. сайт*. URL: <http://www.ezkm.ru> (дата обращения: 18.10.2019).
30. Власов С.В., Кандырин Л.Б., Кулезнев А.В. и др. *Основы технологии переработки пластмасс*. М.: Химия, 2004. 600 с.
31. Холодников Ю.В. Способы изготовления изделий из композитов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №6. С. 214–221.
32. Зуев А.С., Емашев А.Ю., Шайдурова Г.И. Анализ особенностей изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки. Формообразующие оправки // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2018. №3. С. 4–11.
33. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В. *Производство изделий из полимерных материалов*. СПб.: Профессия, 2004. 464 с.
34. Метод ручной выкладки (контактное формование) // *Научно-производственное предприятие «Полет»: офиц. сайт*. URL: <http://www.npppolet.ru> (дата обращения: 18.10.2019).
35. Технологии // Компания «Empire-boats»: офиц. сайт. URL: <http://www.empire-boats.ru> (дата последнего обращения 18.10.2019).