

МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОПИТКОЙ В ОСНАСТКЕ ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Введение

Композиционные материалы (КМ) благодаря комплексу уникальных свойств широко используются в технике. Известно большое количество методов переработки этих материалов в изделия различных размеров, конфигурации и назначения. Среди всего множества методов в последнее время возросло использование методов изготовления деталей из КМ способом пропитки армирующего наполнителя связующим в оснастке. В приведенной ниже статье описано большое количество указанных методов с их кратким описанием. Статья не исчерпывает всего разнообразия методов изготовления деталей из КМ методом пропитки наполнителя в оснастке, но дает общее представление об их возможностях, методах решения тех или иных проблем.

Анализ мировой практики

LCM (Liquid Composite Molding) – общее название методов изготовления деталей из композиционных материалов, заключающихся в пропитке расположенного на оснастку сухого наполнителя движением жидкого связующего сквозь наполнитель [1].

RTM (Resin Transfer Molding). Особенностью метода является применение закрытой жесткой оснастки, состоящей как минимум из двух частей, в зазор между которыми укладывается сухой наполнитель. Оснастка смыкается и в полость подается под давлением связующее в жидком виде. Связующее протекает сквозь наполнитель, смачивает его, вытесняет воздух и полностью заполняет межволоконное пространство в полости оснастки (рис. 1). Давление пропитки может достигать 5...7 МПа, в связи с чем требуются высокая прочность и жесткость оснастки, а также герметичность. Далее связующее отверждается, в результате чего получается деталь из ПКМ, обладающая высокой размерной повторяемостью, высокой долей наполнителя в пластике, низкой пористостью. Существенными недостатками метода являются высокая сложность и стоимость оснастки, необходимость применения специального оборудования подачи связующего под давлением [2, 3].

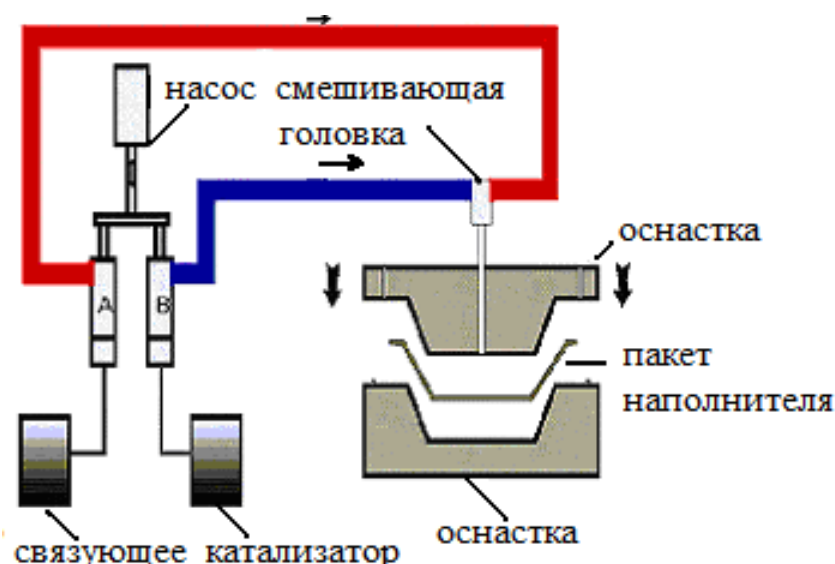


Рисунок 1 – Схема изготовления детали RTM методом

RTM Light, RTML или **L-RTM (Light RTM)** - разновидность метода RTM с использованием сниженного давления подачи связующего и дополнительным использованием вакуума, создаваемого в полости оснастки. Снижение давления подачи позволяет снизить требования к жесткости оснастки и ее стоимости. Вакуум способствует более эффективной пропитке и удалению летучих и воздуха [4].

CM RTM (Closed Mold RTM, North Dakota State University) – вариант названия метода RTM [5].

Marco Method (Marco Chemicals) – первый запатентованный закрытый метод изготовления деталей из композиционных материалов. Существует три разновидности этого метода. В первом варианте жидкое связующее наливается в матрицу или на тканевый наполнитель, уложенный поверх матрицы. Движение пуансона вниз смыкает оснастку, способствуя вытеснению связующего наружу и пропитыванию наполнителя. Во втором варианте в зазор между матрицей и пуансоном в нижней точке под давлением подается связующее, вытесняющее воздух и пропитывающее находящийся в зазоре наполнитель. В третьем варианте матрица и пуансон, в зазоре между которыми находится наполнитель, помещаются в сосуд со связующим. Через трубку, находящуюся в верхней точке, производится отсасывание связующего, которое пропитывает наполнитель [6].

MA RTM (Mandrel-Assisted RTM, Caldwell Design and Fabrication) - этот метод имеет схожие особенности с Marco Method. Основным отличием является образование калиброванной щели толщиной около 1,6 мм между двумя частями оснастки вдоль периметра изделия в

вертикальном направлении. После отверждения изделие легче вынимается из оснастки. По контуру оно имеет полосу вытесненного избыточного связующего [7].

SQ-RTM (Same-Quality RTM, Radius Engineering) - гибрид RTM и автоклавного метода. В жесткую оснастку с интегрированными транспортными каналами, имеющую точки вакуумирования и подачи связующего, укладывается препрег. Оснастка подключается к вакуумированию и подачи под давлением около 0,7 МПа связующего, использованного в препреге. Основное назначение системы подачи связующего — создание давления в полости оснастки. Небольшой объем поступающего связующего позволяет использовать высоковязкие связующие, применяемые в настоящее время в аэрокосмической промышленности для изготовления препрегов, в том числе с функциональными добавками, повышающими ударную прочность [8].

ZPM (Zoned Pressure Molding, Stewart Automotive Research) - RTM процесс, в котором верхняя часть жесткой оснастки разделена на сегменты, имеющие индивидуальные силовые приводы. На нижнюю часть оснастки укладывается сухой наполнитель, поверх которого устанавливается полужесткая мембрана, герметично закрепляемая на нижней части оснастки, в результате чего смыкаются сегменты верхней части оснастки. Сегменты верхней части оснастки в центральной части поднимаются и под мембрану в этой зоне на сухой наполнитель подается связующее под давлением, которое выдувает мембрану в указанной зоне до поднятых сегментов оснастки. При этом образуется полость со связующим над наполнителем. Далее центральные сегменты оснастки смыкаются и поднимаются расположенные рядом с ними периферийные сегменты верхней части оснастки. Далее поднятые сегменты опускаются и поднимаются соседние. Процесс повторяется до полной пропитки наполнителя. При этом создаются условия для пропитки наполнителя в глубину и перемещения связующего из центральной области на периферию. Метод обеспечивает снижение энергопотребления вследствие последовательного включения в работу сегментов, высокую скорость пропитки [9].

DRIV (Direct Resin Injection and Venting, North Coast Tool & Mold) - RTM технология, в которой отсутствие зон непропитанного наполнителя обеспечивается определенной последовательностью точек подачи связующего и вакуумирования (контролируемого слива), располагаемых на формообразующей поверхности. Литниковые выходы связующего имеют малый размер и легко могут быть удалены, не ухудшая качества поверхности [10].

SMRIM (Sequential Multiport Resin Injection Molding, Design Evolution 4) - RTM метод, в котором применение многоточечного впрыска связующего с компьютерным управлением и системой датчиков позволяет снизить время пропитки крупногабаритных изделий, существенно снизить вероятность непропитки сухого наполнителя. По заявлению разработчиков данный метод совместно с применением обогреваемой оснастки и быстроотверждающегося связующего позволил снизить время изготовления панели шасси электромобиля размером 6,3x2 м с 1 часа до 6 минут [11].

3DW-RTM (3-D woven RTM, SNECMA) - метод разработан для изготовления лопаток винтовентилятора и проточной части турбореактивного двигателя. Представляет собой разновидность RTM метода, в котором используются трехмерные плетеные наполнители, а процесс пропитки объединен с приклейкой оковки лопатки в оснастке [12].

SA-RTM (Solvent Assisted RTM). Указанный метод применяют для некоторых видов связующих, для которых применение методов RTM имеет очевидные преимущества, но использование расплавов которых в процессе пропитки невозможно из-за малого времени жизни при температуре плава или высокоплавких компонентов. Для снижения вязкости связующего применяют растворители в виде низкомолекулярных низковязких добавок неактивного типа. Растворитель либо остается в пластике и может выступать в роли пластификатора или должен быть выведен посредством вакуумирования. В [13] приведен пример использования метода SA-RTM для изготовления изделий из высокоплавких полиимидных связующих с помощью этилового спирта.

T-RTM (Thermoplastic RTM) — используется для изготовления изделий методом RTM с применением термопластичных связующих в виде низковязких преполимеров, которые под действием катализаторов при нагреве образуют термопластичную матрицу при пропитке наполнителя. В частности, институт Фраунгофера применяет смесь капролактама или лауролактама с ингибитором и катализатором, полимеризующаяся при температуре около 150° С в Нейлон-6 или Нейлон-12 за 3 минуты. Компания Cyclics Corp. (США) использует циклический бутилен терефталат, который в присутствии катализатора при нагреве до 160...165° С подается в матрицу, образуя линейные молекулы полибутадиев терефталата. Преимуществом данного метода являются высокая скорость получения готового изделия, высокая ударная вязкость пластика, возможность переформования изделия [14].

Advanced RTM (Polytech Ltd.). Метод, автором которого является Blaise Lewark, разработан для изготовления малогабаритных несущих поверхностей (крылатые ракеты, беспилотные ЛА), производимых фирмой Boeing. Единый слой наполнителя укладывается на сформированный синтактный заполнитель с узлом крепления. Собранный пакет помещается в двухстороннюю жесткую оснастку, в которой он пропитывается как в обычном RTM методе [15].

RARTM (Rubber Assisted RTM). В данном методе используется оснастка, изготовленная из эластомерных материалов с высоким коэффициентом термического расширения. При термическом отверждении связующего оснастка расширяется и выдавливает часть связующего в систему дренажа. При этом увеличивается скорость и снижается давление пропитки наполнителя. В [16] указывается, что применение метода позволило сократить время пропитки с 165 до 25 минут. Относительная объемная доля наполнителя в пластике составила 66,9% по сравнению с долей в 65% для метода RTM.

TERTM (Thermal Expansion RTM, TERTM Inc.). В данном методе расширение заполнителя при термическом отверждении изделия после пропитки в оснастке выдавливает избыток связующего, повышая долю наполнителя в слоях ПКМ [17].

CA RTM (Channel-Assisted RTM). Метод предусматривает создание на одной из поверхностей жесткой двухсторонней оснастки временных транспортных каналов для увеличения скорости пропитки сухого наполнителя. Предложены несколько вариантов исполнения временных транспортных каналов: использование подвижных принудительно передвигаемых элементов, перемещение которых по направлению от поверхности создает сеть каналов на поверхности; использование каналов, закрытых эластомерной мембраной, принудительно деформируемой внешним воздействием для образования сети каналов; использование сети каналов, закрытых эластомерной мембраной, которая перемещается внутрь указанных каналов под действием перепада давления между формообразующей полостью в оснастке и полостью каналов. Указанный перепад давления может быть создан за счет соответствующего применения пониженного и/или повышенного давления в полостях. После пропитки принудительно перемещаемые элементы или эластомерная мембрана возвращаются на свое место, обеспечивая гладкость поверхности и отжим избытка связующего [18].

HD-RTM (Hochdruck RTM (нем.)), HP-RTM (High pressure RTM) – высокоавтоматизированная версия метода RTM, разработанная фирмой

KraussMaffei с применением высокого давления подачи связующего при пропитке (порядка 10 МПа). Метод предлагается для производства среднепрочных автомобильных компонентов с высоким темпом производства. В качестве наполнителя рассматривается мат на основе углеродных волокон. Применение метода в производстве позволяет снизить время пропитки и применить высоковязкие эпоксидные и полиуретановые связующие [19].

HS RTM (High-Speed RTM) - разновидность метода RTM, обеспечивающая высокую производительность применительно к средне- и крупносерийному производству. Для этого механизированы или автоматизированы практически все операции изготовления детали, выполняется предварительная подготовка сухого наполнителя на прессах для придания требуемой формы, изготавливаются закладные элементы. Применяются впрыск связующего под высоким давлением в нагретую форму и неполное отверждение связующего с последующим свободным доотверждением. Используются связующие с малым временем отверждения [20].

SC RTM (Short Cycle RTM, Toray) - аналог метода HS RTM, предназначенный для массового крупносерийного изготовления деталей для автомобильной и авиационной промышленности. Метод основан на двух основных технологиях — быстрой пропитки наполнителя и быстрого отверждения связующего. Разработанное связующее сохраняет вязкость ниже 0,3 Па·с в течение 3 минут и отверждается еще за 2 минуты. Пропитка осуществляется через поверхность изделия благодаря большому количеству точек подачи связующего. Общее время цикла изготовления детали составляет не более 10 минут для детали типа внутренней панели автомобильной двери [21].

LC RTM (Lost Core RTM, Daimler AG, Airbus, CoreTech Systems Inc.) – метод изготовления сложных пустотелых изделий методом RTM с применением внутренней формирующей вставки из материала, удаляемого после отверждения, например, вымыванием растворителями (для пластмассы), водой (для керамики), выплавлением (для воска, эвтектических легкоплавких сплавов) или разрушением [22].

CRTM (Continuous RTM, Glasforms Inc.) Данный метод представляет собой комбинацию методов пултрузии и RTM, при котором сухой наполнитель (в том числе с непористым наполнителем) подается на предварительное формирование контура изделия, далее – в калиброванную полость оборудования, в которой происходит пропитка связующим под давлением и отверждение связующего [23].

CRTM (Compression RTM, University of Delaware) или **RTCM**

(Resin Transfer Compression Molding) - процесс, при котором жесткая оснастка, аналогичная применяемой в методе RTM, смыкается не полностью, образуя зазор, в который подается необходимое количество связующего. Затем подача связующего прекращается и оснастка смыкается. Увеличивающееся при смыкании давление в полости заставляет связующее перемещаться от области впрыска к периферии, пропитывая наполнитель. Метод позволяет повысить скорость пропитки наполнителя [24].

DP-RTM (Different Pressure RTM, MT Aerospace AG). При изготовлении изделий этим методом используется оснастка, аналогичная применяемой в методе VARTM, располагается внутри автоклава. Давление впрыска связующего практически соответствует давлению в автоклаве, что способствует сохранению толщины детали (отсутствие раздувания детали по толщине). После окончания пропитки давление подачи связующего снижается, при этом давление в автоклаве способствует вытеснению части связующего с оснастки в дренажную систему, что повышает относительную долю наполнителя и снижает пористость до показателей пластика автоклавного формования [25].

MTRI (MAN Technology Resin Infusion). В этом методе оснастка, аналогичная применяемой при VARTM методе, содержит сухой наполнитель с уложенной на него газопроницаемой мембраной и нетканым материалом для отвода летучих. Указанный пакет герметизируется гибкой мембраной (вакуумным мешком) и оснастка устанавливается в автоклав. Пропитка происходит за счет разрежения в полости под вакуумным мешком аналогично методу VAP, а по завершению пропитки, контролируемому по датчикам, внедренным в сухой наполнитель, осуществляется отверждение под избыточным давлением автоклава, вытесняющим избыток связующего аналогично методу DP-RTM [26].

SLI (Single Line Injection, DLR) - разновидность метода DP-RTM, особенностью которого является то, что линия подачи связующего после завершения пропитки переключается на слив избыточного связующего, выдавливаемого автоклавным давлением [27].

IP RTM (Isostatic Pressure RTM, Northrop Grumman) — метод, в основных чертах соответствующий методу DP-RTM. На одностороннюю оснастку под вакуумный мешок из эластомера укладывается сухой наполнитель. Оснастка устанавливается в автоклав. В полость на оснастке подается связующее под избыточным давлением от насоса, пропитывая наполнитель. После пропитки в автоклаве давление поднимается от атмосферного до давления, равного или несколько

превышающего избыточное давление пропитки, при этом избыток связующего выдавливается и по трубке отводится наружу автоклава. Эластомерная мембрана мешка содержит электрические нагреватели для отверждения связующего [28].

Autoclave RTM (Termal Equipment Corp.). В этом методе оснастка с уложенным наполнителем и вакуумным мешком помещается в автоклав. Подача связующего осуществляется посредством эластичной трубки, уложенной по периметру детали и подключенной к емкости со связующим под давлением или к насосу. Давление в полости оснастки снижается для пропитки наполнителя. Одновременно снижается давление и в автоклаве, что уменьшает перепад давления между автоклавом и полостью формования детали, снижая нагрузку на оснастку. Последняя может быть выполнена менее жесткой и легкой. По мере пропитки наполнителя давление в полости оснастки повышается, при этом система контроля соответственно повышает давление в автоклаве. Повышающееся давление в автоклаве пережимает трубку подачи связующего и при соответствующем подборе параметров трубки и давления в автоклаве полностью прекращает подачу связующего [29].

ComPRIS (Composites Pressure Resin Infusion System, University of Maine) - метод изготовления деталей из КМ, в котором сухой наполнитель укладывается в полость полужесткой оснастки и помещается в автоклав вместе с резервуаром подачи связующего. Дренаж выводится за пределы автоклава, создавая перепад давления между полостью автоклава и атмосферой, создающий условия для пропитки наполнителя. Главной особенностью процесса является применение в качестве оснастки слабопроницаемого материала — древесины, открытоячеистых пенопластов, пористых керамик и пластмасс. Слабопроницаемая оснастка создает условия для отвода газовых включений сквозь свою толщину в дренаж и способствует проникновению связующего в толщину с образованием прочной связи. Комбинация пропитки под давлением и слабопроницаемой оснастки способствует снижению пористости пластика ниже 0,2%. Оснастка либо приформовывается к композиционному материалу, образуя декоративно-эстетическое или защитное покрытие, либо посредством разделительных проницаемых слоев (жертвенная ткань) может быть отделена от изделия. В данном методе существенно снижается количество расходных технологических материалов, изделия отличаются высокой долей наполнителя в готовом виде [30].

Centrifugal RTM (United Technologies) – метод, в котором пропитка сухого наполнителя, находящегося в полости жесткой оснастки,

осуществляется связующим под избыточным давлением, а также за счет центробежных сил, возникающих при вращении оснастки. Избыточное давление в резервуаре со связующим может создаваться поршнем, кинематически связанным с центробежными грузами. Подача связующего осуществляется от центра изделия и оснастки к периферии. Метод применим для изготовления деталей различной конфигурации, особенно осесимметричных. Преимуществом метода по сравнению с классическим RTM являются простое оснащение, увеличение скорости пропитки за счет действия центробежных сил [31].

VIARTM (Vibration Assisted RTM, National Technical University of Athens, Boeing). Низкочастотная вибрация (15...20 Гц), прикладываемая к связующему и наполнителю, позволяет увеличить скорость пропитки плотных наполнителей, снизить вероятность образования зон непропитанного наполнителя, снизить давление пропитки. Пульсации акустического давления, возникающие при низкочастотной вибрации, способствуют преодолению капиллярных сил поверхностного натяжения на границе «волокно – связующее». Высокочастотная вибрация (частота не менее 10^5 Гц, амплитуда порядка 10^{-6} м) позволяет создать высокие скорости сдвига, что обеспечивает снижение сдвиговых сил деформации в неньютоновских жидкостях, какими являются в частности высоковязкие термопластичные связующие. Таким образом, высокочастотная вибрация способствует улучшению консолидации пластика на основе термопластичного связующего при пропитке и схлопыванию пор вследствие высоких возникающих давлений [32].

CIRTM (Co-Injection RTM, University of Delaware) - процесс производства панелей транспортных средств военного назначения, при котором осуществляется пропитка панели несколькими связующими одновременно. Указанные панели объединяют разнородные элементы баллистической защиты, структурные слои и слои внутренней облицовки, отвечающие требованиям к самозатухаемости и малой плотности дыма и опасности продуктов горения (fire, smoke, toxicity). Для структурных зон панели применяются полиэфирные или эпоксидные связующие, а для облицовки — фенольные. Зоны могут быть разделены между собой непроницаемыми, проницаемыми или слабопроницаемыми пленками в зависимости от совместимости связующих и особенностей пропитки панели, а также могут иметь разделитель в виде пленочного клея, совместимого со связующими по механизмам образования жесткосеточного каркаса и температурно-временным характеристикам отверждения [33].

RIRM (Resin Injection Recirculation Molding). Особенностью

данного метода является способ использования избыточного связующего, вытекшего из формы при пропитке наполнителя. При заполнении отстойника подача связующего переключается таким образом, что отстойник становится источником подачи связующего, а в качестве емкости для слива избыточного связующего из оснастки становится очередной отстойник. При наполнении очередного отстойника он становится источником подачи связующего. Метод применяется для связующих с высоким временем жизни [34].

H-VARTM, HT-VARTM (Heated VARTM или High Temperature VARTM). Использование нагретой оснастки и подогретого связующего для снижения вязкости позволяет снизить время и улучшить качество пропитки. **H-RTM, HT-RTM** – аналогичные версии RTM процесса [35].

A-VARTM (Advanced VARTM, Mitsubishi Heavy Industries) - комплекс технологических мероприятий, разработанных совместно Toqay и Mitsubishi Heavy Industries для изготовления крупногабаритных агрегатов аэрокосмической техники с низкой себестоимостью и высоким качеством. Для повышения энергии разрушения ПКМ на основе современных связующих, применяемых в процессах VARTM, наполнитель предварительно покрывается термопластом, выполняющим одновременно роль binder-a, то есть субстрата, удерживающего вместе пакет наполнителя. После этого собранный пакет наполнителя нагревается на технологической форме до температуры размягчения нанесенного термопласта и спрессовывается в единый пакет, образуя так называемый preform, то есть заготовку наполнителя, существенно упрощая процедуры выкладки наполнителя и снижая подвижки слоев в процессе работы с ними. Кроме того, применен особый процесс прошивки наполнителя, отличающийся более высокой проницаемостью для связующего и повышенной энергией разрушения по сравнению с обычной прошивкой. Еще одной особенностью метода A-VARTM является отсос связующего после процесса VARTM пропитки наполнителя, что позволяет повысить долю волокна в ПКМ до уровня изделий, получаемых при автоклавном методе (54...58%). Для ускорения пропитки крупногабаритных изделий применяется особая структура наполнителя с интегрированными каналами распространения связующего и минимальной волнистостью нитей [36].

MIT RTM (Multiple Insert Tooling RTM, Plastech Thermoset Tectonics) - разновидность L-RTM, особенность которого состоит в использовании жесткого основания, на которое устанавливается полужесткая вставка с формообразующей поверхностью. Жесткое основание обеспечивает сохранение формы, содержит крепежные и

стяжные приспособления, систему нагрева и охлаждения. На основание устанавливается вставка с нанесенным гелькоутным слоем и наполнителем и закрывается полужесткой верхней частью оснастки, содержащей систему герметизации, каналы подачи и отвода связующего, датчики и систему отвода избытка связующего. Далее оснастка поступает на этапы подачи связующего и его отверждения. Параллельно на других сменных вкладышах идет процесс нанесения гелькоута и наполнителя. Таким образом, существенно сокращается время оборота основной части оснастки (основание и верхняя часть), снижаются технологические издержки и себестоимость изделия при крупносерийном производстве изделий из ПКМ [37].

ZIP RTM (Zero Injection Pressure RTM, Plastech Thermoset Tectonics) - разновидность L-RTM, в котором используются жесткая нижняя формообразующая часть оснастки и полужесткая или гибкая верхняя часть оснастки, позволяющая снизить затраты на ее изготовление. Для предотвращения раздувания верхней части оснастки в полости оснастки устанавливается датчик давления, контролирующей давление подачи связующего на уровне, обеспечивающем близкое к нулевому значению избыточное давление в полости [38].

RIM (Reaction Injection Molding) - процесс, при котором в полость формообразующей оснастки подаются низкомолекулярные компоненты терморезактивного (например, полиуретаны) или термопластичного (например, полибутилентерефталат) связующего, обладающие низкой вязкостью. Низковязкие компоненты сшиваются посредством реакции полимеризации (реже поликонденсации) с образованием высокомолекулярного материала [39].

SRIM (Structural RIM) или **RRIM (Reinforcement RIM)** - вариант процесса RIM (Resin Injection Mold), при котором в оснастке уложен наполнитель (SRIM) [40] или вместе с компонентами связующего подается рубленое волокно армирующего наполнителя (RRIM) [41].

VACRIM (VACuum RIM) - вариант RIM или SRIM (RRIM), в котором подача низкомолекулярных компонентов осуществляется посредством вакуума, образуемого в полости матрицы [42].

Выводы

1. Методы пропитки в закрытой оснастке применяются для получения изделий, к которым предъявляются требования высокой повторяемости и точности размеров, а также наличие нескольких рабочих поверхностей.

2. Данные методы применимы в крупносерийном производстве.

3. Указанные методы позволяют достичь высоких показателей прочности изделий.

4. Рассматриваемые методы характеризуются высокими затратами на изготовление оснастки, необходимостью применения дополнительного оборудования (установки нагнетания связующего).

5. Одним из ограничивающих факторов, препятствующих распространению методов пропитки в закрытой оснастке в авиационно-космическое производство, являются низкая теплостойкость и ударная вязкость получаемого пластика.

6. Основными направлениями совершенствования методов пропитки в закрытой оснастке являются: сокращение технологического цикла изготовления изделия, обеспечение качественной пропитки и низкой пористости, использование существующего оборудования.

Список использованных источников

1. Liquid Moulding Technologies / C.D. Rudd, A.C. Long, K.N. Kendall, and C.G.E. Mangin. – Woodhead Publishing and SAE International, 1997. - ISBN 1-85573-220-3.

2. Patent № 5,306,448 (US), Int. Cl.⁵ B29C 43/10. Method for resin transfer molding process/Robert V. Kromrey; United Nechnologies Corp. – Appl. No.: 138,776; Filed: Dec. 28, 1987; Date of Patent: Apr. 26, 1994.

3. Patent № 4,762,740 (US), Int. Cl.⁴ B32B 3/02. Resin transfer molding core, perform and process/Carl F. Johnson, Norman G. Chavka; Ford Motor Comp. – Appl. No.: 61,763; Filed: Jun. 15, 1987; Date of Patent: Aug. 9, 1988.

4. Sara Black New approaches to cost-effective tooling / Sara Black // High Performance Composites. – July, 2003. – P.34 – 38.

5. Vaidya K. Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites / K. Vaidya, A. Abraham, S. Bhide //Composites. - 2001. - Part A 32. - P. 1133 – 1142.

6. Patent № 2,495,640 (US), Int. Cl. 154-110. Method of molding/Irving E. Muskat; Marco Chemicals, Inc. – Ser. No.: 598,339; Filed: Jun. 8, 1945; Date of Patent: Jan. 24, 1950.

7. Patent № 6,929,770 (US), Int. Cl.⁷ B29C 70/48. Mandrel-assisted resin transfer molding process employing resin outflow perimeter channel between male and female mold elements/James D. Caldwell; Caldwell Design and Fabrication, L.L.C. – Appl. No.: 10/655,903; Filed: Sep. 5, 2003; Date of Patent: Aug. 16, 2005.

8. Sara Black SQ-RTM enables net-shape parts / Sara Black //High Performance Composites. – September, 2010. – P.44 – 49.

9. Patent № 6,558,590 B1 (US), Int. Cl.⁷. B29C 43/20. Method and machine for manufacturing molded structures using zoned pressure molding/David H. Steward. – Appl. No.: 09/936,874; Filed: Mar. 17, 2000;

Date of Patent: May 6, 2003.

10. Ginger Gardiner RTM showcase :One-Piece Rudder / Ginger Gardiner // High Performance Composites. – January, 2010. – P.34 – 38.

11. Paul Shark Molding a one-pieces chassis for electric car / Paul Shark // Mechanical Engineering. – September, 1999. – P.50-53.

12. Patent № 7,581,932 B2 (US), Int. Cl. F01D 5/14. Method of manufacturing a composite turbomachine blade, and a blade obtained by the method/Dominique Coupe & ors. – Appl. No.: 11/550,606; Filed: Oct. 18, 2006; Date of Patent: Sep. 1, 2009.

13. Patent № 6,784,276 B1 (US), Int. Cl.⁷ C08G 73/10. High-solids polyimide precursor solutions/Chun-Hua Chuang; The United States of America as represented by the United States National Aeronautics and Space Administration. – Appl. No.: 10/202,643; Filed: Jul. 25, 2002; Date of Patent: Aug. 31, 2004.

14. Mallon . P.J. VARTM & RTM Processing of PBT & PA Thermoplastic Composites / P.J. Mallon // Final report to office of Naval Research, Oct. 2002. University of Limerick, Limerick, Ireland.

15. Tool and manufacturing engineers handbook. Desk edition / W.H. Cubberly, Ramon Bakerjian. – SME, 1989. – 1250 p.

16. NASA Technical Reports Server (NTRS) [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19950021847_1995121847.

17. Patent № 5,061,418 (US), Int. Cl.⁵ B29C 67/00. Thermal expansion resin transfer molding/Maximilian Ware; Tertm, Inc. – Appl. No.: 436,776; Filed: Nov. 15, 1989; Date of Patent: Oct. 29, 1991.

18. Patent № 6,919,039 B2 (US), Int. Cl.⁷ B29C 43/12. Channel assisted resin transfer molding/Eric J. Lang, Richard W. Rydin. – Appl. No.: 10/161,442; Filed: Jun. 3, 2002; Date of Patent: Jul. 19, 2005.

19. HP-RTM-Process Advancements [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.speautomotive.com/SPEA_CD/SPEA2010/pdf/ET/ET5.pdf.

20. Characterization and failure analysis of plastics: Collection of articles from ASM International handbook. - ASM International, 2003. – 482 p.

21. Alstec program: characterization of a Short Cycle RTM for mass production»/ M. Yamasaki, I. Taketa & ors // 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto, Japan (2007).

22. Patent № 2008/003740 A1 (WO), Int. Cl. B29C 33/50. Method for producing a fibre composite component using a molding core, and said moulding core/J. Torben, J. Piepen-Brock; Airbus Deutschland GMBH. – Filing Date: 05.07.2007; Publ. Date: 10.01.2008.

23. Glasforms [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.glasforms.com/products/crtm.html.

24. Process analysis of compression resin transfer molding / P. Bhat, J. Merotte, P. Simacek and S.G. Advani //Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 40, Issue 4, April 2009, P. 431 – 441.

25. Winkler P.-J. Materials for transportation technology / P.-J. Winkler. – WILEY-VCH, EUROMAT-volume 1, 2000. – 372 p.

26. Patent EP 1 393 883 B1, Int. Cl. B29C 70/44. Vorrichtung, werkzeuganordnung und verfahren zur herstellung von bauteilen aus faserverbundwerkstoffen mittels temperature-und druckgesteuerter injektionstechnik/T. Lorenz, G. Stegmaier & ors; MT Aerospace AG. –Date of Patent: 06.09.2006.

27. SLI-RTM Fairings for Fairchild Dornier / A.S. Herrmann., A. Pabsch, M. Kleineberg //Do 328 Jet, 22nd SAMPE Europe International Conference, Paris.

28. Patent № 5,863,452 (US), Int. Cl.⁶ B22D 19/00. Isostatic pressure resin transfer molding/Robert L. Harshberger, Keith A. Olsen & ors; Northrop Grumman Corp. – Appl. No.: 837,402; Filed: Apr. 17, 1997; Date of Patent: Jan. 26, 1999.

29. Patent № 5,441,692 (US), Int. Cl.⁶ B29C 70/48. Process and apparatus for autoclave resin transfer molding/Todd Taricco; Thermal Equipment Corp. – Appl. No.: 196,409; Filed: Feb. 14, 1994; Date of Patent: Aug. 15, 1995.

30. Patent № 7,300,894 B2 (US), Int. Cl. B32B 5/26. Composite pressure resin infusion system (ComPRIS)/Barry S. Goodell, Roberto A. Lopez-Anido, Benjamin Herzog; University of Maine. – Appl. No.: 10/732,584; Filed: Dec. 9, 2003; Date of Patent: Nov. 27, 2007.

31. Patent № 5,393,215 (US), Int. Cl.⁶ B29C 45/02. Centrifugal resin transfer molding/Thomas P. Donovan; United Technologies Corp. – Appl. No.: 998,095; Filed: Dec. 30, 1992; Date of Patent: Feb. 28, 1995.

32. Patent № 6,827,896 B2 (US), Int. Cl.⁷ B06B 1/02. Vibration assisted processing of viscous thermoplastics/Stephan Christensen, Eric J. Stober; The Boeing Company. – Appl. No.: 10/438,096; Filed: May. 9, 2003; Date of Patent: Dec. 7, 2004.

33. Patent № 6,048,488 (US), Int. Cl.⁷ B32B 31/12. One-step resin transfer molding of multifunctional composites consisting of multiple resins/Bruce K. Fink & ors; The United States of America as represented by Secretary of the Army. – Appl. No.: 08/956,595; Filed: Oct. 23, 1997; Date of Patent: Apr. 11, 2000.

34. Scott M. Lewit Boatbuilding & Closed Molding: new advances expand options / Scott M. Lewit. //Composites Manufacturing. – October, 2006. – P.12-15.

35. Patent № 2009/0189320 A1 (US), Int. Cl. B29C 43/02. Heat vacuum assisted resin transfer molding process for manufacturing composite materials/Ronnie L. Bolick, Ajit D. Kelkar; North Carolina Agricultural and Nechnical State University. – Appl. No.: 12/361,224; Filed: Jan. 28, 2009; Date of Patent: Jul. 30, 2009.

36. Patent № 7,0785,525 B2 (US), Int. Cl. B29B 13/08. RTM molding method/Noriya Hayashi, Hiroshi Mizuno, Koichi Hasegawa, Kazuo Ota ;

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. – Appl. No.: 11/989,133; Filed: Jul. 27, 2006; Date of Patent: Aug. 31, 2010.

37. Гроховский А. Современное пластиковое судостроение / А. Гроховский // Катера и яхты. – 2009. -№217. – С.152 – 155.

38. JHM Technologies' RTM composites [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.jhmtechnologies.com/JHM/rtm_zipprocess3.html.

39. Patent № 5,196,152 (US), Int. Cl.⁵ B29C 45/14. Reaction injection molding with internal frame and shear edge/Donald R. Gamache, Douglas P. Waszeciak; The Dow Chemical Comp. – Appl. No.: 698,623; Filed: May. 10, 1991; Date of Patent: Mar. 23, 1993.

40. Patent № 5,204,170 (US), Int. Cl.⁵ D03D 3/00. High density structural reaction injection molded composite containing a fabric of nonwoven spunbonded fibers made of a polyester core sheathed in a polyamide skin embedded in a polyurethane matrix/Gregg S. Kuyzin; BASF Corp. – Appl. No.: 738,773; Filed: Aug. 1, 1991; Date of Patent: Apr. 20, 1993.

41. Mazumdar. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering / Mazumdar, Sanjay K. //Boca Raton.CRC Press LLS, 2002. – 396 p.

42. Trevol F. Starr. Composites: a profile of the worldwide reinforced plastic industry, markets and suppliers / F. Trevol. - Elsevier, 1999. – 280 p.

Поступила в редакцию 3.10.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, В.И. Постнов,
УНТЦ «ВИАМ, РФ, г. Ульяновск*