

УДК 678.8

*М.И. Душин¹, К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваяев¹, И.А. Коротков¹***НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЖИДКОСТНОГО ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-8-8

Рассмотрены особенности формования изделий из полимерных композиционных материалов методами пропитки жидкими связующими сухих армирующих наполнителей под вакуумным давлением. Экспериментально определены величины капиллярного давления и форм-фактора при исследовании проницаемости. Исследовано влияние скорости подачи связующего и капиллярного давления на образование пористости в пластике. Даны рекомендации по скорости подачи связующего для получения минимальной пористости в пластике.

Ключевые слова: пористость, безавтоклавное формование, инфузия, армирующие наполнители, капиллярное и вакуумное давление.

Features of molding of products from polymeric composite materials by methods of impregnation of dry reinforcement by liquid resin under vacuum pressure are considered. Values of capillary pressure and form factor on the device while studying permeability are experimentally determined. Influence of resin feed rate and capillary pressure on formation of porosity in plastic is investigated. Recommendations about resin feed rate to obtain the minimum porosity in plastic are given.

Keywords: porosity, non-autoclave molding, infusion, reinforcing fillers, capillary and vacuum pressure.

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

Произошедший в последние два десятилетия стремительный рост доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях гражданских самолетов (Боинг-787, А380 и др.) позволил добиться существенного снижения их массы, повышения надежности и ресурса. По прогнозам развития мирового рынка гражданской авиации можно ожидать увеличения спроса на летательные аппараты [1, 2]. В таких условиях вопрос снижения издержек при сохранении качества в производстве деталей для летательных аппаратов выходит на первый план и заставляет производителей искать пути снижения их себестоимости путем внедрения новых материалов и энергосберегающих технологий [3–7]. Высокая стоимость изделий из ПКМ во многом определяется большой трудоемкостью и энергоемкостью автоклавной технологии их изготовления, наиболее широко применяемой в настоящее время в авиастроении, а также высокой стоимостью оборудования.

Начиная с 1988 г. за рубежом ведутся интенсивные исследования по разработке альтернативных автоклавным методам формования ПКМ, к которым относятся методы так называемого жидкостного формования, обеспечивающих высокое качество и практически готовую форму изделия при минимальных затратах ручного труда и снижении стоимости производства. Это проявляется, с одной стороны, в конкретных разработках оборудования и технологической оснастки, а с другой – в проведении исследований по

расширению возможностей технологий и повышению эксплуатационно-технических характеристик изготавливаемых изделий [8–10].

Разработанный в 1950 г. «метод двух шаблонов», носящий название метод Марко, широко используется с тех пор для изготовления изделий водного применения (шлюпки, яхты, гребные лопасти, палубные надстройки и пр.) [11]. В ВИАМ группой исследователей под руководством начальника лаборатории В.В. Павлова в 50-х годах прошлого века была разработана технология изготовления крупногабаритных антенных обтекателей высотой до 3 м для самолетов и ракет. Металлическая оснастка рассчитана на избыточное давление пропитки до 10–15 кН/м². Этот метод получил название «метода пропитки под давлением» (Resin Transfer Molding – RTM), который в настоящее время является основой методов так называемого «жидкостного формования», в которых жесткая верхняя часть оснастки заменена на эластичный пуансон в виде герметичной пленки, а давление пропитки осуществляется только за счет вакуума. Разработаны два схожих метода изготовления:

- пропитка пленочным связующим (Resin Film Infusion – RFI) [8, 9];
- пропитка жидким связующим под вакуумом (вакуумная инфузия) – VaRTM [12–14].

Видов метода VaRTM разработано более 20 наименований. Эти методы предусматривают наличие герметичной оснастки, в которой находится заготовка (преформа) из сухих армирующих наполнителей, в которую под действием избыточного давления подается жидкое связующее, заполняя все имеющиеся пустоты, образованные волокнами. Далее производится отверждение связующего, оснастка разбирается и вынимается готовое изделие. Отличительной особенностью этих методов от метода автоклавного формования является возможность использования в качестве армирующего наполнителя толстых преформ объемного плетения [15], а также изготовление значительно больших изделий [16].

При изготовлении пластика методом VaRTM жидкое связующее, поступающее из открытой емкости, под действием вакуума быстро растекается по поверхности сухого пакета заготовок по специальной распределительной сетке, обладающей низким гидравлическим сопротивлением. Одновременно происходит пропитка сухого пакета наполнителя в трансверсальном, т. е. поперечном направлении, под действием вакуумного и капиллярного давлений. С удалением потока связующего от порта подачи до порта приема, связанного с вакуумом, происходит падение давления от максимального до нуля вдоль направления течения связующего, что наглядно видно на рис. 1, а. Поэтому при изготовлении крупногабаритных изделий необходимо ввести дополнительные порты подачи связующего.

При пропитке пленочным связующим давление пропитки падает в направлении толщины от максимального до нуля, что наглядно видно на рис. 1, б [16]. Изготовление крупногабаритных изделий с помощью технологии вакуумной инфузии является ее отличительной особенностью и преимуществом. Метод не требует дорогостоящего оборудования и позволяет осуществлять визуальный контроль процесса пропитки, что также относится к его преимуществу.

Данные технологии и их модификации являются в настоящее время одними из главных элементов получения перспективных интегральных конструкций из ПКМ. В связи с этим растет интерес к разработке способов получения волокнистых преформ сложной формы. Использование сухих преформ вместо препрегов является одной из основных отличительных особенностей данных технологий. Для обеспечения заполнения всех пустот преформ при пропитке под вакуумным давлением необходимо использовать связующее с малой вязкостью – менее 0,3 Па·с. Выбор таких смол ограничивается полиэфирными, виниловыми эфирами и эпоксидными смолами с низкими температурами стеклования. Это требование следует отнести к другой особенности жидкостного формования. Процесс RFI является альтернативой методу RTM и соединяет его достоинства с гибкостью препреговой технологии.

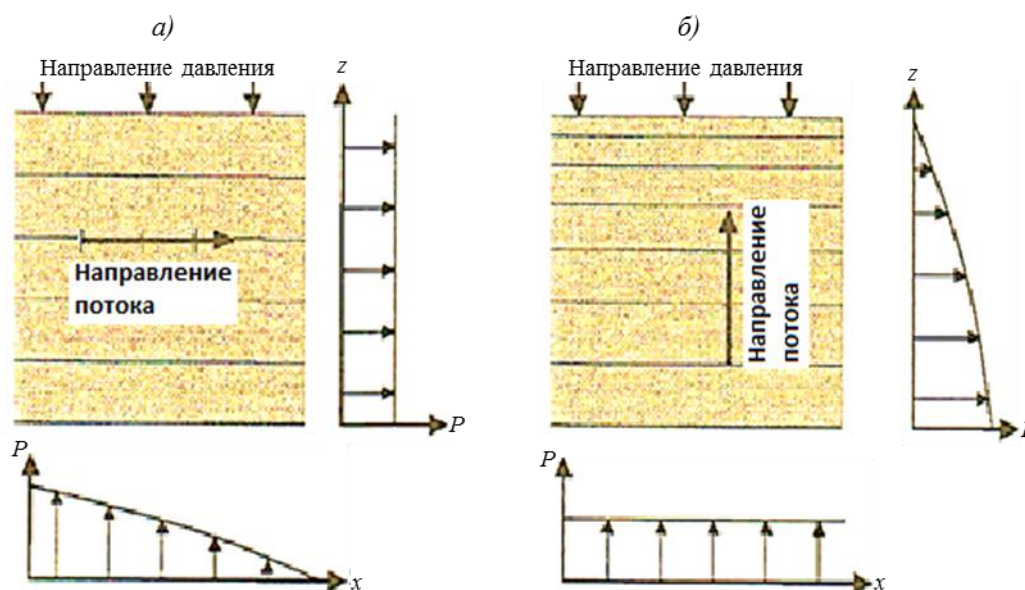


Рис. 1. Изменение давления в вакуумном пакете при проведении пропитки методами VaRTM (а) и RFI (б)

Процесс RFI разработан NASA совместно с фирмой Boeing для изготовления обшивки крыла длиной 13 м гражданского транспортного самолета [12]. Вязкость расплава связующего заметно выше, чем у связующих, используемых в методах RTM и VaRTM. Однако расположение пленочного связующего на оснастке по всей поверхности изготавливаемой обшивки обеспечило его инфильтрацию непосредственно в направлении толщины преформы, сократив во много раз путь, проходимый расплавом, и как результат – позволило использовать связующее с более высокой вязкостью и отказаться от применения более дорогих связующих с высокой вязкостью разрушения. Для полной пропитки преформы на всю ее глубину иногда используется дополнительно автоклавное давление.

Низкое давление впрыска для легкого RTM-процесса (инфузии) снижает стоимость и сложность изготовления необходимой оснастки. Тем не менее низкое давление впрыска влияет на движение потока связующего на большие расстояния (по распределительной сетке с малым сопротивлением течению связующего) и проникновение его в сухую заготовку сложной структуры. Это можно рассматривать как наиболее уникальные характеристики процесса инфузии, влияющие на процесс пропитки. При определенных условиях, таких как низкое давление впрыска и высокое содержание волокна в заготовке, капиллярное давление может значительно повлиять на общий поток связующего из-за микроскопического потока его внутри жгута и высокой смачивающей способности. В этих случаях капиллярное давление является значительной движущей силой и должно быть принято во внимание, чтобы оптимизировать использование процесса пропитки для снижения брака, – например, для исключения образования сухих пятен, а также макро- и микропустот.

С 1946 г. после разработки стекловолокон в СССР, а затем с 1970 г. после создания углеродных, борных и органических волокон – во ФГУП «ВИАМ» ведутся работы по разработке и внедрению в авиационную, ракетную и другие отрасли техники новых ПКМ на их основе. Данный обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17–22].

Цель данной работы – на основании анализа публикаций показать некоторые особенности технологии изготовления изделий из ПКМ методами жидкостного формования сухих армирующих заготовок (преформ) с возможностью обеспечения получения минимального содержания пор в материалах.

Теоретические основы жидкостного формования

Процессы жидкостного формования подчиняются закону фильтрации, разработанному в 1856 г. французским инженером Дарси на основании экспериментальных исследований течения воды через песчаные грунты (фильтры). Несмотря на то что закон Дарси был открыт для случайных малосжимающихся пористых сред, многочисленными экспериментами подтверждена его применимость для волокнисто-пористых структур, к которым относятся преформы, состоящие в основном из заготовок тканей или объемно-армированных преформ. В моделях изучения течения некоторыми авторами найдены расхождения в применимости закона Дарси, связанные с игнорированием последствий микроскопических потоков связующего в нитях при определении проницаемости тканых структур [23–28]. Одномерное уравнение в законе Дарси может быть выражено как

$$u_x = \frac{Q_x}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx}$$

или

$$u_x = \varepsilon v_x = \varepsilon \frac{dx}{dt}, \quad (1)$$

где Q_x – расход связующего, м³/с; A – площадь поперечного сечения формовки, перпендикулярного потоку, м²; v_x – скорость истечения связующего по распределительной сетке, м/с; u_x – скорость течения связующего сквозь наполнитель, м/с; $\frac{dP}{dx}$ – градиент давления, Па/м; k – коэффициент фильтрации; ε – пористость наполнителя, %; μ – вязкость связующего, Па·с.

Из уравнения (1) следует, что пропитка определяется коэффициентом фильтрации, вязкостью связующего и перепадом давления и осуществляется до тех пор, пока есть градиент давления. По данным А.В. Лыкова [29] капилляром считается пора, радиус которой равен или менее 10^{-5} м. В таких системах жидкость может проникать через волоконно-пористые материалы и при отсутствии давления за счет капиллярных сил, создаваемых смачиванием и поглощением. При этом скорость движения жидкости связана обратной зависимостью с радиусом капилляра и отношением вязкости к поверхностному натяжению жидкости. Поэтому капиллярная структура волокнистых материалов отнесена к важнейшим факторам, влияющим на скорость и полноту пропитывания, так как поступление в эти материалы жидкости – процесс, который управляется в основном факторами капиллярности и вязкости. Капиллярное давление P_c теоретически оценивали уравнением Янга–Лапласа, примененным к идеализированным капиллярным трубкам. Чем меньше угол контакта смачивания, тем больше капиллярное давление. Капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от цилиндрических трубок: каналы между волокнами в нитях не имеют круглого сечения, причем площадь сечения по длине одного и того же канала может меняться в широких пределах. Большинство каналов в волокнистых системах не закрыты с боков и имеют ответвления. Волокнистые структуры в отличие от грунтов значительно изменяются по проницаемости при их уплотнении. При соприкосновении ткани с жидкостью без дополнительного давления первыми заполняются мелкие поры и при их заполнении начинают заполняться крупные поры, капиллярное давление уменьшается и становится

равным нулю при полном насыщении структуры. В тканых структурах распределение поровых размеров и форм в различных направлениях различно, поэтому в формулу капиллярного давления вводят безразмерный коэффициент – так называемый форм-фактор (F), который зависит от направления потока для геометрически разных конфигураций волокнистых сред. Эта связь выражается для одномерного течения формулой:

$$P_c = \frac{F}{D_f} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \sigma \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

где D_f – диаметр волокна, м; σ – поверхностное натяжение смачивания, Па/м; θ – угол контакта между жидкостью и волокном, град; F – безразмерный коэффициент; ε – пористость армирующего наполнителя, %.

Для однонаправленной волокнистой заготовки коэффициент F считается равным 4 в направлении волокна, а в поперечном направлении 2.

Для тканых структур коэффициент F может быть определен лишь косвенно по результатам экспериментов. В работе [30] представлен разработанный прибор для определения поперечной проницаемости углеродных тканей, на котором определяли также капиллярное давление P_c и коэффициент F . Уравнение, основанное на законе Дарси, использовано в эксперименте в измененной форме:

$$x^2 = \frac{2k}{\mu\varepsilon} \cdot (P_m - P_c) \cdot t, \quad (3)$$

где x^2 – глубина пропитки, см; t – время, с; P_m – приложенное механическое давление, Па.

Одновременное определение значений обоих давлений в экспериментальных исследованиях является интересной задачей и было использовано в компьютерных программных исследованиях коэффициента проницаемости и капиллярного давления [31].

Экспериментальные исследования направлены на определение проницаемости и капиллярного давления при условии отделения величины проницаемости от капиллярного давления, а также проведено изучение влияния давления впрыска на проницаемость.

Эксперимент проводили на изотропной стеклоткани с почти одинаковым числом нитей основы и утка. Диаметр волокна 9 мкм с покрытием в виде аппрета равен 10,5 мкм. Масса 1 м² ткани составляет 546 г/м², толщина слоя равна 0,48 мм. В качестве жидкости использовали:

- силиконовое масло с плотностью 0,96 г/см³ и кинематической вязкостью 100 сСт (100 мм²/с) при 25°C и поверхностным натяжением 20,9 Н/м;
- эпоксидную смолу с плотностью 1,1–1,2 г/см³, вязкостью 1,0–1,4 Па·с.

Процесс инъекции жидкости в пакет наполнителя компьютеризирован: сбор данных от датчиков давления осуществлялся со скоростью – одно чтение в секунду, которое тут же преобразовывалось в показания давления. Жидкость, находившаяся в емкости, подавалась с помощью избыточного давления, подаваемого в емкость. Предварительно установленное давление варьировалось в диапазоне 15–90 кПа.

Полагая вязкость используемых жидкостей постоянной на протяжении всего эксперимента, с учетом постоянного давления впрыска ($P_c + P_m$), из интегрированного уравнения Дарси получаем выражение проницаемости заготовки при механическом и капиллярном давлениях:

$$\frac{x^2}{2t} = \frac{k}{\mu\varepsilon} \cdot P_m + \frac{k}{\mu\varepsilon} \cdot P_c, \quad (4)$$

где x – расстояние между входом и выходом потока жидкости, см.

Если экспериментальные условия таковы, что значением P_c можно пренебречь по сравнению со значением P_m , тогда второй член в правой части уравнения (4) будет равен нулю и уравнение превращается в следующее уравнение:

$$x^2 = \frac{2k}{\mu \varepsilon} \cdot P_m \cdot t. \quad (5)$$

Использование уравнения (5) для оценки проницаемости при RTM методе позволяет минимизировать последствия ошибок. Если нельзя игнорировать влияние капиллярного давления при оценке проницаемости, то меняя величину давления P_m в течение определенного времени, величина капиллярного давления будет лежать на прямой линии, которая пересекает ось изменения давления в момент, когда $P_c = -P_m$. Таким образом, использование уравнения (5) дает определение коэффициента фильтрации k от наклона x^2 . В описываемом уравнении установлено, что величина проницаемости не зависит от прикладываемого давления впрыска. В результате проведенных экспериментов получена величина форм-фактора: 3,81 – при пористости 0,56 и $P_c = 5505$ Па; 3,79 – при пористости 0,47 и $P_c = 7957$ Па.

Процесс инфузии при жидкостном формовании носит характер «двойного течения»: по крупным порам между нитями основы и утка (макропорам) связующее движется за счет наличия градиента давления в соответствии с законом Дарси, а по микропорам – за счет капиллярных сил и продолжается даже тогда, когда градиент давления отсутствует. Согласно уравнению Уошберна, величина капиллярного давления зависит от радиуса капилляра поры и тем выше, чем он меньше. Под радиусом поры волокнистых структур понимают либо условный радиус цилиндрической поры, либо отношение объема поры к ее поверхности (гидравлический радиус).

При исследованиях процессов жидкостного формования с помощью вакуумной инфузии замечено, что скорость подачи жидкости влияет на образование пористости в изготавливаемых изделиях, поэтому необходимо разобраться с этой особенностью в процессах, происходящих при пропитке. Экспериментально обнаружено, что скорость подачи связующего является ключевым фактором, регулирующим образование микро- и макропор при заполнении преформ жидкостью. Следовательно, существует оптимальная скорость, которая минимизирует образование пустот в готовых изделиях. Известно, что содержание пор в ПКМ в значительной степени влияет на внутрислойную сдвиговую прочность и на прочность при продольном сжатии [32, 33]. Поэтому вопросу получения беспористых пластиков при изготовлении изделий безавтоклавными методами посвящено много исследований и публикаций [34–38].

Экспериментальные и аналитические исследования

При проведении исследований замечено, что если связующее подается под постоянным давлением, то поры образуются внутри пучков волокон (нитей, жгутов) во фронте течения связующего вблизи места впрыска, так как там самая большая скорость потока. С другой стороны, поры, образующиеся между пучками волокон на пересечении нитей основы с нитями утка, формируются в отдалении от места впрыска, там, где скорость потока минимальна и образуются микроскопические потоки внутри жгутов. Это обусловлено тем, что при малой скорости потока капиллярные силы отбирают связующее из межжгутовых зазоров внутрь пучков волокон и за фронтом связующего образуется крупная пора. Таким образом, преформа при малой скорости течения связующего превращается в фитиль, который втягивает связующее в пучки волокон за счет капиллярных сил, действующих в них.

В работах [39–43] экспериментально установлено, что формирование пор во фронте течения коррелирует с безразмерной величиной, называемой капиллярным числом Ca , которое является отношением вязкости связующего к его поверхностному натяжению:

$$Ca = \frac{\mu \cdot u}{m \cdot \gamma \cdot \cos Q}, \quad (6)$$

где μ – вязкость связующего, Па·с; u – скорость течения связующего, см/с; m – пористость армирующего наполнителя, %; γ – поверхностное натяжение связующего, Н/м; Q – угол смачивания, град.

Если скорость течения связующего велика (большое капиллярное число), то течение в макропорах опережает течение в микропорах и в них «запирается» воздух. Если скорость течения мала, то пузырек воздуха «запирается» в макропорах, откуда связующее после их заполнения отводится за счет капиллярных сил в микрокапилляры пучков волокон.

В работе [44] исследовали влияние скорости подачи связующего на порообразование, связывая ее с получаемым капиллярным числом. Исследованы три вида армирующих наполнителей на основе стеклянного волокна: маты из рубленого волокна, равнопрочная и однонаправленная ткани. Работы проводили на образцах размером 350×250 мм инъекцией эпоксидного связующего с поверхностным натяжением $\gamma=35$ мН/м и вязкостью 0,1 Па·с. Скорость инъекции варьировали в пределах от 6 до 18 мл/с. По результатам экспериментов построили кривые изменения пористости от объема подаваемого связующего. Кривые изменения пористости от скорости подачи преобразовали в функцию капиллярного числа (рис. 2) и обнаружили, что при низких скоростях подачи связующего капиллярные силы становятся доминирующими, затягивая поток жидкости через пучки волокон ткани, в которых, если и образуется, то минимальное количество пустот. При этом макропустоты образуются в местах переплетения нитей основы с нитями утка. При больших скоростях потока связующее проходит в основном через пустоты, образуемые пересечением основы с утком, создавая при этом большое количество микропустот в межволоконных зазорах.

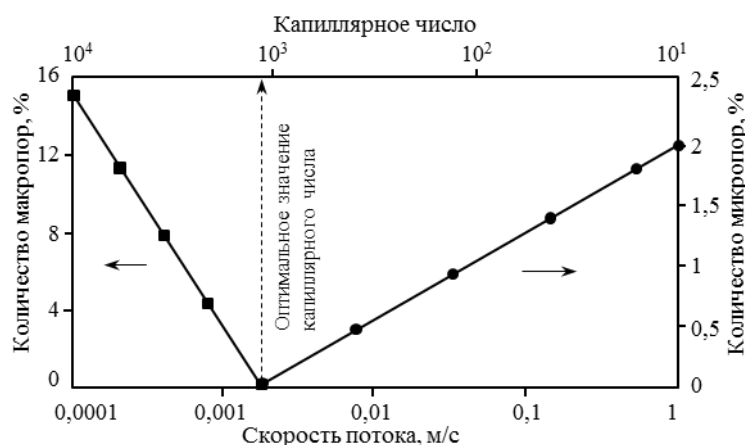


Рис. 2. Зависимость образования макро- и микропористости от скорости подачи связующего

В работе [45] проведено компьютерное моделирование процесса вакуумной инфузии с одновременной проверкой результата с помощью экспериментальной инъекции. Тест проводили составными частями вдоль направления течения для выявления преимуществ предлагаемой оптимизации. Предложенный численный подход приводит

к быстрому расчету оптимальной инъекции путем регулирования открытия и закрытия портов подачи связующего и вентиляционных (вакуумных) отверстий.

В работе [40] установлено, что оптимальная скорость пропитки в капиллярах связана с числом капиллярности зависимостью

$$V_{\text{пропитки}} = \frac{Ca_{\text{опт}} \cdot \gamma}{\mu} \quad (7)$$

Показано также, что скорость течения в макроскопической области армирующих наполнителей в соответствии с законом Дарси, устанавливающим соотношение между скоростью и градиентом давления, определяется зависимостью

$$V_{\text{потока}} = \frac{[K]}{\mu \cdot \Phi} \cdot \Delta P, \quad (8)$$

где $V_{\text{потока}}$ – скорость потока связующего, см/с; $[K]$ – коэффициент проницаемости; μ – вязкость связующего, Па·с; ΔP – градиент давления, Па; Φ – пористость (общая) наполнителя, %.

С учетом того, что микро- и макропустоты образуются вблизи фронта течения, приравняв оптимальную скорость капиллярного движения к скорости течения фронта связующего, получили (а затем экспериментально подтвердили), что скорость фронта должна соответствовать скорости капиллярного течения. Это достигается регулированием давления впрыска и величиной разрежения, а также изменением характеристик связующего – вязкости и поверхностного натяжения.

В работах [39, 41, 46] показано, что процент микро- и макропустот находится в обратной логарифмической зависимости от скорости потока связующего. Выделили три случая образования микро- и макропустот:

- если продолжительность заполнения межжгутовых пространств (макропор) значительно больше, чем межволоконных пространств, то поры образуются между волокнами (микропоры);

- если продолжительность заполнения крупных и мелких пор приблизительно одинакова, то поры не образуются ни в жгутах между волокнами, ни в ткани между жгутами основы и утка;

- если продолжительность заполнения межжгутовых зазоров меньше продолжительности заполнения внутри жгутов, то поры образуются в межжгутовых переплетениях (макропоры).

На образование пористости в ПКМ, изготавливаемых инфузионными методами или пропиткой под давлением, влияет не только воздух, оставшийся в наполнителе, но и влага, содержащаяся в нем и в связующем. При изготовлении изделий методом автоклавного формования поры, образующиеся в процессе отверждения, при формовании под высоким давлением остаются в пластике в небольшом количестве. Однако при инфузионном формовании давление существенно меньше, чем при автоклавном, поэтому получение деталей с низкой пористостью становится непростой задачей. Ткани, используемые для изготовления изделий по технологии жидкостного формования, если они находятся в обычных цеховых условиях, всегда содержат так называемую капиллярную влагу в зонах переплетения моноволокон в жгутах, где радиус поры меньше или равен 10^{-5} м. Удалить капиллярную влагу, удерживаемую тканью, тем труднее, чем меньше радиус капилляра [42]. Влага при нагревании превращается в пар и под вакуумом 1 л воды превращается в 1000 л пара. Сила связи капиллярной влаги с пористым материалом пропорциональна высоте h_{max} , на которую поднялась влага в капиллярах, и зависит от радиуса капилляра следующим образом:

$$h_{\max} = \frac{2\sigma \cdot V \cdot \cos Q}{M \cdot r \cdot g}, \quad (9)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости; V – мольный объем; Q – краевой угол смачивания, образуемый жидкостью на стенке капилляра; M – молекулярная масса жидкости; r – радиус капилляра; g – ускорение силы тяжести.

На удаление капиллярной влаги, по данным работ [47, 48], требуется дополнительный расход энергии, поэтому необходимо от нее избавиться до процесса пропитки с помощью сушки ткани при повышенной температуре. Воздух, находящийся в ткани, удаляется вакуумом, а для удаления капиллярной влаги требуется нагрев для превращения ее в пар под вакуумом при температуре $>70^\circ\text{C}$. Поэтому перед проведением процесса пропитки ткань должна быть просушена до сборки пакета, а затем подвергнута вакуумированию под герметизирующей пленкой. Дегазировать связующее для удаления влаги и летучих необходимо до начала пропитки. Используемые материалы (ткани и связующие) перед процессом формования должны быть обезвожены посредством сушки и дегазации вакуумированием.

Заключения

С учетом данных из рассмотренных научных литературных источников можно констатировать следующее. На основании теории пропитывания волокнисто-пористых материалов рассмотрены теоретические (и экспериментально подтвержденные) условия образования пористости в ПКМ при изготовлении изделий методами жидкостного формования инфузией под вакуумным давлением. Установлено, что для исключения образования «двойного течения» при пропитке скорость подачи связующего под давлением должна быть близка к скорости его проникновения в межволоконные пространства за счет капиллярных сил. Ключевую роль в образовании микро- и макропор в изделиях, изготавливаемых методами пропитки сухих армирующих наполнителей жидкими связующими, играет капиллярное число. Необходимо также обращать внимание на подготовку используемых материалов к процессу пропитывания с точки зрения сушки стеклоткани и вакуумирования связующего для удаления имеющейся в них влаги и летучих продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
3. Душин М.И., Хрульков А.В., Платонов А.А., Ахмадиева К.Р. Безавтоклавное формование углепластиков на основе препрегов, полученных по растворяющей технологии // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 43–48.
4. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-S2-24-28.
5. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Assessment of semi-impregnated fabrics in honeycomb sandwich structures // Composites. A. 2010. Vol. 41. P. 8–15.
6. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
7. Repecka L., Boyd J. Vacuum-bag-only-curable prepregs that produce void-free parts // 47-th International SAMPLE Symposium. 2002. P. 1862–1875.
8. Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structures: pat. 4902215 US; publ. 20.02.90.

9. Loos A.C. Low-cost fabrication of advanced polymeric composites by resin infusion processes. *Adv. Composite Mater.* 2001. Vol. 10. No. 2–3. P. 99–106.
10. Dexter H.B. Development of Textile Reinforced Composites for Aircraft Structures // 4th Internat. Symp. For Textile Composites. Kyoto, Japan, Kyoto Institute of Technology, 1998. P. 36–45.
11. Метод Марко: пат. 2495640 США; опубл. 12.09.50.
12. Beckwith S.W., Hyland C.R. Resin Transfer Molding: A Decade of Technology Advances // *SAMPLE J.* 1998. Vol. 34 (6). P. 7–19.
13. Composite materials handbook. Ford Belvour, 2002. Vol. 3–5: Polimer matrix composites materials usage, design, and analysis. P. 693.
14. Resin film infusion process and apparatus: pat. 4622091 US; publ. 03.11.86.
15. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии.* 2013. №1. С. 35–39.
16. Душин М.И., Чурсова Л.В., Хрульков А.В., Коган Д.И. Особенности изготовления полимерных композиционных материалов методом вакуумной инфузии // *Вопросы материаловедения.* 2013. №3. С. 33–40.
17. Ouahbi T., Saouab A., Breard J., Ouagne P., Chaten S. Modeling of hydro-mechanical coupling in infusion process // *Composites: part A.* 2007. Vol. 38. P. 1646–1654.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2012. №11. С. 2–16.
19. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал.* 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.
20. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А. и др. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // *Безавтоклавные технологии переработки полимерных композиционных материалов нового поколения: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 13.*
21. Душин М.И., Хрульков А.В., Гусев Ю.А., Караваев Р.Ю. Роль капиллярного числа в процессах пропитки преформ жидкими связующими // *Вопросы материаловедения.* 2013. №4. С. 86–91.
22. 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.
23. Wood J.R., Bader M.G. Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental evaluation of a diffusion model for the growth and collapse of gas bubbles // *Compos. Manuf.* 1994. №5 (3). P. 149–158.
24. Visconti I.C., Langella A., Durante M. The influence of injection pressure on the permeability of unidirectional fibre preforms in RTM // 8th European Conference on Composite Materials (ECCM-8). Naples, Italy. June 3–6, 1998. P. 737–43.
25. Gauvin R., Trochu F., Lemenn Y., Diallo L. Permeability measurement and flow simulation through fiber reinforcement // *Polymer Composites.* 1996. Vol. 17 (1). P. 34–42.
26. Griffin P.R., Grove S.M., Russell P., Short D., Summerscales J., Guild F.J., Taylor E. The effect of reinforcement architecture on the long-range flow in fibrous reinforcement // *Composites Manufacturing.* 1995. Vol. 6 (3–4). P. 221–235.
27. Steenkamer D.A., Wilkins D.J., Karbhari V.M. Influence of test fluid on fabric permeability measurements and implications for processing of liquid moulded composites // *Journal of Materials Science Letters.* 1993. Vol. 12 (13). P. 971–973.
28. Chan A.W., Larive D.E., Morgan R.J. Anisotropic permeability of fiber preforms: constant flow rate measurement // *Journal of Composite Materials.* 1993. Vol. 27 (10). P. 996–1008.
29. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 123 с.

30. Ahn K.J., Seferis J.C., Berg J.C. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements // *Polymer Composites*. 1991. Vol. 12 (3). P. 146–52.
31. Amico S., Lekakou C. An experimental study the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding // *Composites Science and Technology*. 2001. Vol. 61. P. 1945–1959.
32. Рудобашта С.П. Массоперенос в системе с твердой фазой. М.: Химия, 1980. С. 18.
33. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
34. Браутман Л. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978. 153 с.
35. Vacuum resin impregnation process: pat. 4942013 US; publ. 17.07.90.
36. Double bag vacuum in fusion process: pat. 7413694 US; publ. 07.12.00.
37. Method and device for producing fiber – reinforced components am injection method: pat. 68353 WO; publ. 20.09.01.
38. Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process: pat.1181149 EUR; publ. 01.10.03.
39. Способ изготовления волокнистых композитов вакуумной инфузией и устройство для осуществления способа: пат. 2480335 Рос. Федерация; опублик. 20.10.06.
40. Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat // *Polym. Eng. Sci.* 1995. Vol. 35 (10). P. 837–851.
41. Rohatgi V., Patel N., Lee L.J. Experimental investigation of flow induced microvoids during impregnation of unidirectional stitched fiberglass mat // *Polym. Compos.* 1996. Vol. 17 (2). P. 161–170.
42. Ruiz E., Achim V., Bread J., Chatel S., Troughu F. A fast numerical approach to reduce void formation in liquid composite molding // *The 8-th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM-8)*. Douai, 2006. P. 251–260.
43. Bread J., Henzel Y., Trough F., Gauvin R. Analysis of dynamic flow through porous media. Part I: Comparison between saturated and unsaturated flows in fibrous reinforcements // *Polym. Compos.* 2003. Vol. 24. No. 3. P. 409–421.
44. Lee G.W., Lee K.J. Mechanism of void formation in composite processing with woven fabrics // *Polymer and Polymer Composites*. 2003. Vol. 11. No. 7. P. 563–570.
45. Patel N., Lee L.J. Effect of fiber mat architecture on void formation and removal in liquid composite molding // *Polym. Compos.* 1995. Vol. 16 (5). P. 386–399.
46. Patel N., Rohatgi V., Lee L.J. Modeling of void formation and removal in liquid composite molding. Part II. Model development // *Polym. Compos.* 1996. Vol. 17 (1). P. 104–114.
47. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №6 (42). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
48. Кавказов Ю.Л. Взаимодействие кожи с влагой. М.: Гилепром, 1952. 258 с.