

УДК 678.8

*М.И. Душин<sup>1</sup>, К.И. Донецкий<sup>1</sup>, П.Н. Тимошков<sup>1</sup>, Р.Ю. Караваяев<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
БЕЗАВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ СЕМИПРЕГОВ  
НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-21-31

*Увеличение выпускаемых объемов, и особенно габаритов аэрокосмических изделий из композитов, потребовало поиска более дешевых, альтернативных автоклавному способам их изготовления. Наиболее дешевыми оказались способы жидкостного формования сухой преформы пропиткой связующим. Возникшие проблемы получения высококачественных низкопористых изделий методом вакуумного формования привели к разработке семипрегов, представляющих собой ткани или жгуты наполнители, которые совмещаются с пленкой связующего. Многие фирмы-производители композиционных материалов включают в номенклатуру своей продукции широкую линейку семипрегов. В работе рассмотрены исследования процессов получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе семипрегов посредством их формования с помощью атмосферного давления взамен автоклавного для изготовления конструкций, в том числе средне- и высоконагруженных. Исследована взаимосвязь пористости и проницаемости армирующих наполнителей, вязкости связующих и ряда других параметров с целью получения ПКМ с минимальной пористостью и свойствами, приближенными к свойствам ПКМ, полученных методом автоклавного формования.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ), семипреги, препреги, волокно, связующее, пропитка, проницаемость, пористость.

*M.I. Dushin<sup>1</sup>, K.I. Donetskiy<sup>1</sup>, P.N. Timoshkov<sup>1</sup>, R.Yu. Karavaev<sup>1</sup>***RESEARCH OF PROCESS OF OUT-OF-AUTOCLAVE FORMATION  
SEMI-PREGS ON THE BASIS OF CARBON FILLERS (review)**

*The increase in let-out volumes and especially dimensions of products from composite, has demanded search of cheaper alternatives to avtoklave way of manufacturing of products. Ways of liquid vacuum formation dry preformes impregnation binding have appeared the cheapest. The arisen problems of receiving high-quality products vacuum formation have led to development semi-pregs, representing fabrics or cordlike fillers which are duplicated with film of the binding. Many manufacturing firms of materials include in the nomenclature of the materials wide ruler semi-pregs. In work researches of processes of receiving polymeric composite materials (PCM) on the basis of developed semi-pregs by means of their formation by means of atmospheric pressure instead of autoclave for manufacturing of load bearing structures are considered. The interrelation of porosity of plastics, permeability, and some other parameters for the purpose of receiving PCM with minimal porosity and properties, approximate to avtoklave formation is investigated PCM.*

**Keywords:** polymeric composite materials (PCM), semi-pregs, prepregs, fiber, impregnation, permeability, porosity.

<sup>1</sup>Федеральное 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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) из-за малой плотности и высоких удельных характеристик применяются в летательных аппаратах с момента их разработки: стеклопластики – с 1940-х годов, а угле-, боро- и органические пластики – с 1970-х годов. Важными параметрами переработки ПКМ являются давление и температура, с помощью которых контролируют уплотнение материала, отверждение связующего и конечное качество изготовленных деталей. Так, первоначально при внедрении их в конструкцию самолетов основным фактором формования было давление атмосферы через герметичный вакуумный мешок, в котором формовались в основном слабонагруженные детали – как монолитные, так и трехслойной сотовой конструкции с обшивками из ПКМ. Кроме формования под вакуумным мешком, в авиационной промышленности СССР до внедрения автоклавного формования (при активном участии сотрудников ВИАМ – разработчиков ПКМ) были разработаны и внедрены другие методы создания давления – такие как пресс-камерный, автоклавный (с паровым или водяным обогревом), прессования в жесткой форме, нагнетания связующего в форму, намотки нитью, напыления и насыпания рубленого стекловолокна [1].

Свойства изготовленных вакуумным формованием материалов были низкими из-за их высокой пористости, оказывающей влияние на механические характеристики при сдвиге и сжатии. С расширением объемов применения и повышением требований к свойствам получаемых изделий (особенно к прочности при межслойном сдвиге и сжатии) перешли на формование в автоклаве, позволяющем обеспечить высокое давление (6–7 ат (0,6–0,7 МПа)). В дальнейшем метод автоклавного формования стал основным методом для производства ответственных изделий [2], позволяющим получать изделия с низкой (не более 1–2%) пористостью, влияющей на межслойное разрушение при изгибе и сжатии. В настоящее время производство изделий из ПКМ осуществляется в основном в автоклавах посредством автоматизированной выкладки полуфабрикатов. В качестве основы для формования используют полуфабрикаты – препреги, представляющие собой ткань или плотно уложенные однонаправленные жгуты, пропитанные связующим. Собранный пакет из заготовок препрега (ламинаты) упаковывается в герметичный мешок, из которого вакуумированием удаляется воздух, затем он подвергается формованию в автоклаве под давлением при повышенной температуре. Несмотря на преимущества, присущие автоклавам, в аэрокосмической промышленности тенденция замены их на более дешевые технологии с менее затратными капиталовложениями и без ограничения размеров изготавливаемых изделий, налагаемого размером автоклава, становится все более заметной.

Увеличение выпускаемых объемов, и особенно габаритов аэрокосмических изделий из композитов, потребовало поиска более дешевых, альтернативных автоклавному способам изготовления. Наиболее выгодными оказались ранее используемые методы – формование препрегов и пропитка сухого армирующего наполнителя под атмосферным давлением (RTM – Resin Transfer Molding). Существуют три разновидности пропитки под давлением: непосредственно пропитка под избыточным давлением сухого армирующего наполнителя в герметичной жесткой форме; пропитка под вакуумным давлением (VaRTM – Vacuum assisted RTM) под герметичной пленкой, заменившей верхнюю жесткую часть формы; пропитка пленочным связующим (RFI – Resin Film Infusion). Общее название этих методов за рубежом – жидкостное формование сухой преформы пропиткой связующим (LCM – Liquid Composite Molding) [3, 4].

Во ФГУП «ВИАМ» исследования по разработке материалов и технологий их изготовления проводятся в рамках реализации комплексной научной проблемы

13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5–7].

Первоначальные попытки вакуумного формования препрегов, используемых при автоклавном формовании, приводили к получению деталей с высокой пористостью (5–10%). В препрегах при их изготовлении и выкладке на оснастку захватывается воздух, который при формовании в автоклаве уплотняется или растворяется под высоким давлением, а при воздействии вакуума воздух от нагрева расширяется и остается в виде пузырей (пустот) в материале, так как атмосферное давление не способно их уплотнить. Высокое давление в автоклаве улучшает монолитность деталей и уменьшает пористость и размеры пустот до приемлемых пределов, что приводит к получению высококачественных изделий. В работе [8] показано, что наличие влажности в препреге может привести к образованию пустот при изготовлении ПКМ вакуумным формованием, однако в автоклаве более высокое давление вызывает конденсацию влаги, благодаря чему подавляется рост пустот.

Проблема получения высококачественных изделий вакуумным формованием привела к разработке нового поколения препрегов – безавтоклавных ООА-препрегов (out-of-autoclave), также называемых за рубежом семипрегами. Проведено множество исследований, направленных на улучшение понимания взаимодействия параметров процесса и их влияния на дефекты в семипрегах при их переработке [8–11]. Использование таких материалов может заменить автоклавное формование только в том случае, если изделия, полученные методом формования с помощью атмосферного давления, будут обладать теми же свойствами, что и полученные в автоклаве. Семипреги созданы для того, чтобы обеспечить получение композитов с минимальной для ПКМ пористостью (менее 1–2%). Они представляют собой ткани или жгутовые наполнители, которые совмещаются с пленкой связующего, частично пропитывающего их с одной стороны. Сухие зоны в ткани образуют взаимосвязанную и относительно проницаемую сеть каналов, позволяющую удалять газы при вакуумировании. Ведущие фирмы-производители автоклавных препрегов, такие как Hexcel, Cytec и Tencate, выпускают семипреги, выбирая разный уровень пропитки по отношению к сухому участку ткани, который они считают оптимальным для эффективного удаления газовой фазы. Динамика пропитки зависит от свойств используемых материалов и условий производства и, вероятнее всего, влияет на качество получаемых деталей. Однако это соотношение качества и свойств в настоящее время четко не установлено и исследования в этом направлении продолжают.

### **Образование пор в процессе формования семипрегов**

Первоначально при комнатной температуре связующее в семипреге представляет собой гель с высокой вязкостью. Вакуумное давление помогает удалению газа и уменьшению пористости наполнителей в течение всего процесса формования, а повышенная температура способствует проникновению связующего в волокна и его отверждению. По мере продолжения цикла отверждения и повышения температуры вязкость связующего падает, а затем под действием давления происходит пропитка наполнителя, из которого уже удален воздух. Такой способ изготовления ПКМ приводит к получению более низкопористостого пластика [12–16] по сравнению с безавтоклавным формованием. На содержание пустот в препрегах влияют многие факторы, в том числе условия процесса (температура, вакуум и давление), тип препрега (химический состав, структура волокна), ориентация слоя, схема укладки, оснастка и составляющие вакуумного мешка. Пустоты могут появляться также за счет механического захвата воздуха – во время изготовления, укладки, приготовления связующего и т. п. [17]. Однако

следует отметить, что как только вязкость связующего увеличивается и происходит его гелеобразование, дальнейшего изменения пористости не наблюдается:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{св}} = \frac{\gamma}{m}, \quad (1)$$

где  $P_{\Gamma}$  – давление газа;  $P_{\text{св}}$  – давление в связующем;  $\gamma$  – поверхностное натяжение жидкой смолы;  $m$  – отношение объема пустот к площади его поверхности.

Рост пустот может происходить за счет диффузии влаги, воздуха или других летучих веществ, повышения температуры или слияния соседних пустот [18, 19]. В работе [18] исследован рост пустот на основе диффузии водяного пара в сферическую воздушную пустоту, окруженную связующим, в автоклавном процессе. Результаты показали, что первоначальная относительная влажность препрега и внешнее давление во время цикла отверждения являются двумя важными параметрами, влияющими на конечный диаметр пустот. Исследование влияния исходной относительной влажности на содержание пустот показало, что вакуумное формование препрегов значительно увеличило пористость, в то время как в автоклаве этого не произошло. Высокое давление, достигаемое при автоклавном формовании, является основным средством уменьшения размера пустот посредством их сжатия или растворения газа в связующем. Следовательно, при вакуумном формовании уменьшения размера пустот можно достичь, снижая давление внутри самих пустот, что обеспечивается путем удаления захваченных газов из препрегов с помощью вакуумного отсоса. В настоящее время не существует полного представления о формировании и эволюции пустот, влиянии и эффективности других факторов, таких как размер заготовки и ее геометрическая форма, уровень вакуума и другие условия процесса. Систематическое изучение этих факторов приведет к улучшению понимания процесса образования пустот и получению изделий с низкой пористостью.

#### **Удаление газа и летучих продуктов из заготовки (преформы) изделия**

Основным средством уменьшения пустот (снижения пористости) является уменьшение давления газа в пустотах. Для этого собранная на оснастке заготовка изделия из семипрегов помещается в вакуумный мешок, из которого откачивается газ (воздух). Тканые и жгутовые наполнители состоят из большого числа тонких моноволокон диаметром (7–10 мкм), собранных в виде жгутов или нитей. Такие структуры по классификации, приведенной в работе [20], относятся к капиллярно-пористым материалам, поры которых имеют тонкие, изменяющиеся по длине и сечению, микрокапилляры с радиусом в пределах  $10^{-5}$ – $10^{-9}$  м, а также крупные поры, образованные в зонах пересечения нитей основы и утка. Капилляры с радиусом  $>10^{-5}$  м считаются макрокапиллярами. Они не собирают влагу из влажного воздуха, а наоборот, отдают ее в атмосферу, насыщенную водяными парами, поэтому, согласно работе [21], отнесены к макрокапиллярам. Влажность известна как одна из основных причин образования пустот в безавтоклавных препрегах. Рост пустот может происходить за счет диффузии влаги из связующего в пустоту [18, 19].

Удаление паровоздушной смеси, находящейся в семипрегах, – сложный процесс, обусловленный рядом причин, проявляющихся в большей или меньшей мере в зависимости от характеристик пористой среды (величины и конфигурации пор, распределения пор по размерам, характера соединения их между собой), энергетического состояния поверхности стенок пор, температуры, давления, степени заполнения пористой части и т. п. Движение паровоздушной смеси при создании вакуума происходит за счет молекулярной диффузии, кнудсеновской диффузии, стефановского потока, термодиффузии, теплового скольжения в микро- и макропорах, циркуляции парогазовой смеси в порах,

конвективно-фильтрационного переноса под действием градиента общего давления и т. д. [22]. Твердая фаза, т. е. армирующий наполнитель, перекрывает часть сечения, по которому движется диффузионный поток, и удлиняет путь этого потока, при этом плотность капиллярного потока постепенно уменьшается.

Модель Кардоса является наиболее часто упоминаемой моделью роста пустот на основе процесса диффузии [18]. С ее помощью прогнозируют влияние содержания влаги связующего на диаметр образовавшихся пустот. В этой модели предполагается, что сферическая пустота расположена в бесконечной среде изотропного связующего, и ее рост происходит вследствие диффузии воды из окружающего связующего. Используя эту модель, можно предсказать эволюцию изолированных пустот в связующем через диффузию:

$$d = 4\beta\sqrt{Dt}; \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_{\text{bulk}} - C_{\text{void}}}{\rho_r}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр пустот;  $\beta$  – движущая сила роста пор;  $D$  – коэффициент диффузии воды в связующем;  $t$  – время диффузии;  $C_{\text{bulk}}$  – концентрация воды в объеме связующего;  $C_{\text{void}}$  – концентрация воды на поверхности пор;  $\rho_r$  – плотность газа.

Еще один способ транспортировки газа, относящийся к объемному потоку, носит название адвекции. Газовую адвекцию в пористой среде можно проанализировать с использованием закона Дарси [23], который гласит, что поверхностная скорость газа прямо пропорциональна газопроницаемости пористой среды и градиенту давления газовой фазы в направлении потока:

$$v = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{dP}{dx}, \quad (4)$$

где  $K$  – газопроницаемость;  $\mu$  – газодинамическая вязкость;  $P$  – давление газа;  $x$  – расстояние, которое проходит газовая фаза.

Закон Дарси применим к ламинарному потоку: переход от ламинарного режима течения к турбулентному зависит от числа Рейнольдса, которое определяет границу между режимами турбулентного и ламинарного течения, – в диапазоне от 1 до 10 [24]. В среде с низким давлением или низкой проницаемостью происходит переход от ламинарного потока к кнудсеновской диффузии или свободному молекулярному потоку.

Предпосылкой для потока Дарси в пористой среде является наличие непрерывной сети, через которую может происходить массовое движение газа. Частично пропитанные препреги представляют собой пористую среду, имеющую сложную микроструктуру, которая изменяется во время процесса. Эта пористая сеть состоит из соединенных и изолированных пустотных пространств, окруженных связующим и волокнами. Поток проходит через взаимосвязанную сеть пустот, пока они открыты и не заполнены связующим. Давление внутри взаимосвязанной сети пустот может быть уменьшено посредством потока связующего и вакуума, тогда как давление внутри изолированных пустот может изменяться только посредством газодиффузионных механизмов при постоянных условиях объема.

### Проницаемость армирующих наполнителей

Важную роль при изготовлении пластиков с использованием семипрегов играет проницаемость волокнистого наполнителя [25, 26], которая рассчитывается на основе предполагаемой модели потока и измеренных данных, связанных с потоком – например, расход и давление.

Волокнистые пористые материалы образуют стабильную структуру с высокой удельной поверхностью и с относительно низким сопротивлением потоку. Однако в случае семипрегов волокна частично пропитаны связующим, и в течение цикла отверждения пористая структура изменяется по мере проникновения в нее связующего, которое в свою очередь влияет на проницаемость слоистого материала. Исследование проницаемости ткани в плоскости укладки и в поперечном направлении показало ее анизотропию, и, как правило, она значительно выше в горизонтальной плоскости по сравнению с поперечной для семипрегов, которые созданы путем нанесения полимерной пленки на поверхность сухих волокон [24, 27, 28]. Определение проницаемости сухих углеродных однонаправленных тканей фирмы Porcher (арт. 3673 и 4510) показало также, что поперечная проницаемость меньше продольной [3].

В работе [29] исследована проницаемость семипрега по методу, основанному на законе Дарси [30], применительно к трехслойным конструкциям. Цель этого исследования состояла в том, чтобы измерить начальную сквозную воздухопроницаемость семипрега при комнатной температуре в условиях вакуумного мешка, а также изучить происходящие изменения во время цикла отверждения. Метод падения давления требует проведения оценки проницаемости в момент выравнивания давления между двумя объемами. Воздухопроницаемость может быть рассчитана путем контроля измерения давления в ограниченном объеме до тех пор, пока обе стороны не будут в равновесии.

Для сравнения оценивали проницаемость препрега и семипрега, пропитанных одним и тем же связующим VTM264, содержание которого в исследуемом семипреге составляло 40% (по массе), в препреге: 34% (по массе). Для семипрега проницаемость измеряли в двух направлениях – вдоль и поперек укладки слоев. Показано, что семипрег имеет начальную воздухопроницаемость в ~1,5 раза выше, чем препрег, что облегчает его использование при изготовлении трехслойных конструкций за счет уменьшения давления на соты при изготовлении.

В работах [31, 32] представлены результаты исследования процесса изготовления ПКМ на основе семипрега. В исследованиях использовали три вида семипрегов на основе тканей разного плетения и двух видов связующих: полотняного плетения с использованием смолы CYCOM 5320 и двух видов тканей сатинового плетения (восьми- и пятиремизные на основе смол CYCOM 5320 и МТМ45-1 соответственно). Показано, что семипрег на основе смолы CYCOM 5320 и ткани полотняного плетения демонстрирует более высокую степень пропитки, чем восьмиремизная ткань после 16 ч вакуумирования без образования участков сухого волокна. Семипрег на основе пятиремизной ткани также полностью пропитывается во время изготовления.

На рис. 1 показано оптимальное значение поперечной жгутовой проницаемости для каждого материала в зависимости от давления.

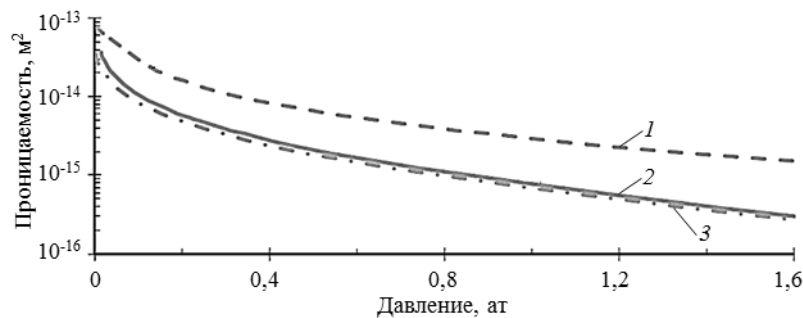


Рис. 1. Значения поперечной жгутовой проницаемости для тканей полотняного плетения (1) и сатинового плетения восьми- (2) и пятиремизных (3)

Как и ожидалось, более плотные жгуты восьмиремизной ткани менее проницаемы по сравнению с тканями полотняного плетения и пятиремизной. Обнаружено, что начальная степень отверждения смолы оказывает наиболее важное влияние на продолжительность пропитки. Скорость роста температуры также оказывает значительное влияние на пропитку жгута, причем более высокие скорости обычно приводят к значительно более быстрой пропитке. Например, для семипрегов на основе смолы СУСОМ 5320 увеличение скорости подъема температуры с 0,5 до 3°С/мин при неизменности всех других параметров пропитки привело к уменьшению времени заполнения на ~75% за все время цикла.

Обнаружено, что температура выдержки имеет ограниченный эффект при низких начальных степенях отверждения, так как чаще всего полная пропитка достигается во время температурного подъема. Однако увеличение температуры выдержки с 93 до 121°С выгодно при более высоких степенях отверждения, при которых желательна максимально возможное снижение вязкости.

Наконец, путем сравнения семипрегов на основе смолы СУСОМ 5320 обнаружено, что структура волокон значительно влияет на пропитку жгутов. В ткани простого плетения имеются жгуты с более удлиненными и менее плотными участками, обеспечивающими более быстрый поток смолы и, следовательно, полностью пропитывающимися в более широком диапазоне циклов отверждения. Только очень высокие уровни вязкости смолы при первоначальном отверждении приводят к образованию микропузырьков. И наоборот, более густое и волоконно-плотное восьмиремизное плетение служит причиной более медленной кинетики потока, и поэтому более восприимчиво к микропустотам в условиях высокой вязкости, вызванным высокими начальными степенями отверждения и низкими скоростями изменения температуры или температурной выдержки.

Для анализируемых материалов продолжительность пропитки тканей значительно варьируется в зависимости от свойств материалов и параметров процесса их изготовления. В идеальном случае – при низкой начальной степени отверждения и высокой скорости подъема температуры и выдержки – быстро произойдет полная пропитка. Однако, поскольку на практике переработка часто отклоняется от оптимальных параметров, поток связующего при пропитке замедляется и могут возникать условия, приводящие к появлению микропотоков. Такие отклонения могут произойти при выкладке препрегов на крупногабаритную металлическую оснастку, которую трудно равномерно и быстро нагреть, что является обычным явлением при изготовлении больших изделий, для которых и разработаны семипрега. Так, различия в структуре ткани, объемная доля волокна и проницаемость могут значительно изменить динамику пропитки. В целом результаты исследований показали, что полная пропитка может быть достигнута для всех трех типов семипрегов.

В статье [33] основное внимание уделено изучению и характеристике природы потока связующего, возникающего во время процесса пропитки семипрегов. В этом исследовании использовали два семипрега марки Gurit: ST94-RC200T и ST94-RC303T, которые разработаны и используются для формования вне автоклава. Слой полимерной пленки проникает в слой ткани минимально, поэтому смоляная пленка и слой ткани могут рассматриваться как отдельные области семипрега. Оба рассматриваемых семипрега представляют собой углеродные ткани с полимерной пленкой, содержащей 42% связующего. Семипрег ST94-RC200T имеет поверхностную плотность ткани 200 г/м<sup>2</sup> с 3000 волокон в каждом жгуте и ширину жгута ~2 мм, а семипрег ST94-RC303T имеет поверхностную плотность ткани 303 г/м<sup>2</sup> с 12000 волокон в жгуте и ширину жгута ~6 мм (рис. 2).

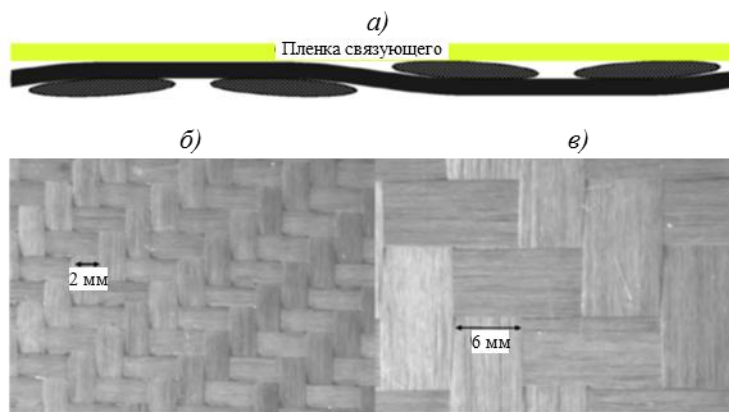


Рис. 2. Схема сечения препрега, изображающего слой смолы и ткани (а); сухая сторона семипрегов марок ST94-RC200T (б) и ST94-RC303T (в) размером 25×20 мм

Особое внимание уделено моделированию поведения потока, возникающего в процессе движения полимерной пленки в результате давления, создаваемого массой пленки (2 кПа) и дополнительных грузов (от 15 до 54 кПа), для установления проницаемости тканей. В эксперименте не использовалось атмосферное давление (101 кПа), а только масса пленки и грузов для исключения влияния давления на волокна в тканях. Цель работы [33] заключалась в том, чтобы получить зависимость между приложенным давлением и потоком пленки. Модель учитывает проницаемость между отдельными жгутами ткани и внутри жгутов между отдельными волокнами, задавая значение проницаемости для пустого пространства между волокнами [34–37]. При поддержании постоянного давления и температуры во время каждого эксперимента, влияние каждого из этих параметров процесса на временной шкале может быть легко выявлено.

В работе [38] показана возможность доработки технологии изготовления тканей и модифицирование смолы с целью сокращения продолжительности и стоимости изготовления ответственных изделий безавтоклавным формованием семипрегов. Разработана методика, позволяющая выпускать ткани, пригодные для семипрегов с поверхностной плотностью до 2000 г/м<sup>2</sup> вместо стандартных для автоклавного формования (~300 г/м<sup>2</sup>). Причина, по которой трудно изготовить препрег большой толщины, заключается в пропитке – трудно пропитать связующим ткань с высокой поверхностной плотностью. Доработанная смола позволяет пропитывать такие тяжелые ткани благодаря ее низкой вязкости. Эти семипреги предназначены для изготовления деталей из углепластиков со свойствами материалов, получаемых в автоклаве способом безавтоклавного формования.

В публикации [39] сообщается, что вакуумное формование для изготовления деталей вторичных структур (закрылки, обтекатели и т. п.) широко применяется. Производство композитов для аэрокосмической отрасли безавтоклавным способом с использованием только вакуумного мешка и атмосферного давления также не является новшеством. Инновационный метод обеспечивает возможность получения материалов с содержанием пор <1% и механическими свойствами, сопоставимыми с теми, которые получают при автоклавном формовании, для изготовления аэрокосмических силовых конструкций, таких как крылья, фюзеляжи и оперение с интегрированными ребрами жесткости. Разработчики материалов для Военно-воздушных сил США считают семипреги жизненно важными материалами и видят дополнительную экономию денежных средств при их использовании. Однако многие вопросы остаются нерешенными – например, продолжительность цикла формования, которая фактически может быть

больше (по сравнению с продолжительностью формования автоклавных препрегов) из-за длительного вакуумирования, необходимого для получения материала с низкой пористости; совместимость с клеем, т. е. качество поверхностей сэндвич-структур; возможность использования средств автоматизации при выкладке.

Одним из наиболее значимых преимуществ семипрегов является снижение высоких капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с использованием автоклавов. Предполагается, что в будущем, по военным программам самолеты будут выпускаться в небольших объемах с ограниченным бюджетом. Использование семипрегов позволяет развернуть гибкое и универсальное производство, менее зависимое от традиционных монументальных автоклавных производств, что может оказать решающее влияние на увеличение прогнозного применения композитов до 60–70% в следующих поколениях авиалайнеров различных производителей.

### Заключения

В данном обзоре проанализирована взаимосвязь между свойствами материалов, параметрами процесса и пропиткой сухой части препрегов. Исследованные семипреги, изготовленные с использованием различных тканей и с разными связующими, показали полную пропитку сухой части тканей после удаления воздуха и нагрева, что свидетельствует об их пригодности для создания беспористых изделий методом вакуумного формования.

Следует отметить, что за рубежом методике изготовления ПКМ из семипрегов безавтоклавным формованием с помощью вакуумного давления уделяется большое внимание. Известные фирмы-производители препрегов для автоклавного формования Hexcel, Cytec, Tencate уже выпускают широкую линейку семипрегов на основе различных тканей и связующих. Изготавливаемые промышленным способом семипреги активно внедряются в производство силовых деталей изделий как военного, так и гражданского назначения, например компаниями Lockheed Martin и Boeing, а также применяются в рамках различных проектов NASA и DARPA.

Исследование процессов получения семипрегов и технологий их переработки является важной и перспективной задачей, которой необходимо уделить особое внимание.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теревенин Б.П. Технологические особенности изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика // Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. М.: Оборонгиз, 1960. 168 с.
2. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Исследование технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №8. С. 12–15.
3. Душин М.И., Чурсова Л.В., Хрульков А.В., Коган Д.И. Особенности изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии // Вопросы материаловедения. 2013. №3. С. 33–40.
4. Душин М.И., Мухаметов Р.Р., Платонов А.А., Меркулова Ю.И. Исследование фильтрационных характеристик армирующих наполнителей и связующих при разработке технологии безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 22–25.
5. 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.

6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
7. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
8. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepregs – effect of dissolved moisture // Composites Science Technologies. 2010. Vol. 70. P. 2304–2309.
9. Ridgard C. Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace, Defense and Space Structures // International SAMPE Symposium. 2009. P. 134–136.
10. Thomas S., Bongiovanni C., Nutt S.R. In Situ Estimation of through-Thickness Resin Flow using Ultrasound // Composites Science and Technology. 2008. Vol. 68. No. 15–16. P. 3093–3098.
11. Донецкий К.И., Душин М.И., Мищун М.И., Севастьянов Д.В. Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №12 (60). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.07.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-8-8.
12. Thorfinnson B., Biermann T.F. Production of Void Free Composite Parts without Debulking // International SAMPE Symposium. 1986. P. 71–74.
13. Thorfinnson B., Biermann T.F. Degree of Impregnation of Prepregs: Effects on Porosity // International SAMPE Symposium. 1987. P. 28–32.
14. Boyd J. Tutorial: Vacuum Bag Only Composite Part Manufacturing // International SAMPE Symposium. 2003. P. 7–10.
15. Arafath A.R.A., Fernlund G., Poursartip A. Gas Transport in Prepregs: Model and Permeability Experiments // ICCM-17. 2009. P. 43–47.
16. 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: 31.07.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
17. Campbell F.C., Mallow A.R., Browning C.E. Porosity in Carbon Fiber Composites an Overview of Causes // Journal of Advanced Materials. 1995. Vol. 26. No. 4. P. 18–33.
18. Kardos J.L. Void Growth and Dissolution // Processing of Composites. 2000. Vol. 1. P. 182–206.
19. Zingraff L. Void Formation and Transport during Liquid Moulding and Forming of Reactive Thermoplastic Composites: PhD Thesis. École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2004. 231 p.
20. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гос. изд-во технико-теоретич. литер., 1954. 472 с.
21. Кавказов Ю.Л. Взаимодействие кожи с влагой. М.: Гизлегпром, 1952. 320 с.
22. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
23. Putnam J.W., Seferis J.C. Prepreg Gas Permeation as a Function of Fiber Orientation and Aging Time // Journal of Advanced Materials. 1995. Vol. 26. No. 3. P. 35–41.
24. Gaskell D.R. An Introduction to Transport Phenomena in Materials Engineering. Macmillan Publishing Company, 1992. 143 p.
25. Civan F. Porous Media Transport Phenomena. John Wiley & Sons, 2011. 448 p.
26. Gas Transport in Porous Media / Eds. by S.W. Webb, C.K. Ho. Springer, 2006. 303 p.
27. Louis B., Hsiao K., Fernlund G. Gas Permeability Measurements of Out of Autoclave Prepreg MTM45-1/CF2426A // International SAMPE Symposium. Seattle, 2010. P. 342–354.
28. Xin C., Li M., Gu Y. et al. Measurement and Analysis on in-Plane and through-Thickness Air Permeation of Fiber/Resin Prepreg // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2011. Vol. 30. No. 17. P. 1467–1479.
29. Tavares S.S., Michaud V., Menson J.A.E. Assessment of semi-impregnated fabrics in honeycomb sandwich structures // Composites Applied Science Manufactory. 2010. Vol. 41. P. 8–15.
30. Ahn K.J., Seferis J.C., Price J.O., Berg A.J. Permeation Measurements Through Prepreg Laminates // Sampe Journal. 1991. Vol. 27. No. 6. P. 19–25.
31. Centea T., Hubert P. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT // Composites Science and Technology. 2011. Vol. 71. P. 593–599.

32. Gutowski T.G., Cai Z., Bauer S. et al. Consolidation experiments for laminate composites // *Journal of Composites Materials*. 1987. Vol. 21 (7). P. 650–669.
33. Cender T.A., Simacek P., Advani S.G. Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability // *Composites: Part A*. 2013. Vol. 53. P. 118–128.
34. Simacek P., Neacsu V., Advani S.G. A phenomenological model for fiber tow saturation of dual scale fabrics in liquid composite molding // *Polymer Composites*. 2010. Vol. 31. P. 1881–1889.
35. Hwang W.R., Advani S.G. Numerical simulations of Stokes–Brinkman equations for permeability prediction of dual scale fibrous porous media // *Physical Fluids*. 2010. Vol. 22. P. 113–115.
36. Zhou F., Alms J., Advani S. A closed form solution for flow in dual scale fibrous porous media under constant injection pressure conditions // *Composition Science Technologies*. 2008. Vol. 68. P. 699–708.
37. Zhou F., Kuentzer N., Simacek P. et al. Analytic characterization of the permeability of dual-scale fibrous porous media // *Composition Science Technologies*. 2006. Vol. 66. P. 2795–2803.
38. Umemoto Y., Gouke M., Mashima Y. Out of autoclave material «semi-preg». Technical development of resin transfer molding // *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Composite materials (Korea, August 21–26, 2011)*. 2011. Paper No. TH05-2.
39. Out-of-autoclave prepregs: Hype or revolution? // *CompositesWorld*: [офиц. сайт журнала] <http://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-prepregs-hype-or-revolution> (дата обращения: 31.07.2018).