

Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков

В.А. Нелюб, канд. техн. наук Д.В. Гращенко, канд. техн. наук Д.И. Коган, И.А. Соколов

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

E-mail: mail@emtc.ru

Поступила в редакцию 27.03.2012 г.

Проведен сравнительный анализ современных методов прямого формования изделий из стеклопластиков, которые не требуют предварительного приготовления препрегов. Установлено, что для производства изделий сложной геометрии из эпоксидных связующих наиболее эффективной технологией является использование метода вакуумной инфузии.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, инфузия, прямые методы формования.

Конструкционные материалы, в том числе и полимерные композиционные материалы (ПКМ), во многом определяют высокий уровень современной авиакосмической техники, что связано с их высокой надежностью, весовой эффективностью, хорошими технологическими и эксплуатационными свойствами. В связи с ужесточением требований к эффективности летательных аппаратов, возрастают требования к материалам. Уровень рабочих нагрузок, температур, давлений постоянно повышается, что приводит к расширению номенклатуры материалов и повышению их прочности, трещиностойкости, термо- и морозостойкости и др. функциональных свойств.

Одним из существенных недостатков ПКМ является их высокая стоимость, которая во многом определяется длительностью процесса их формования, ограниченной жизнеспособностью получаемых препрегов и высокой стоимостью технологического оборудования (наиболее дорогостоящим является автоклавное оборудование, необходимое для отверждения). Разработка новых технологий, которые исключают необходимость использования автоклавного оборудования

и изготовления препрега, являются очень актуальными.

Альтернативой препрегово-автоклавной технологии изготовления деталей из ПКМ, а также технологии контактного формования стали так называемые «прямые» процессы (*Directprocesses*) [1]. Суть «прямых» процессов заключается в совмещении операций пропитки наполнителя связующим и формования детали, что приводит к сокращению временного цикла изготовления детали, энерго- и трудозатрат и, как следствие, удешевлению технологии. В настоящее время существуют три основных технологии получения деталей из ПКМ таким способом:

- пропитка под давлением (*Resin Transfer Molding — RTM*);
- инфузионная пропитка под вакуумом (*Vacuum Infusion — VARTM*);
- пропитка пленочным связующим (*Resin Film Infusion — RFI*).

Суть способа пропитки под давлением (технология *RTM*) заключается в следующем: армирующий наполнитель в необходимом количестве укладывается в форму, которая далее герметизируется, и через дренажную систему под давлением в нее подается связующее. Процесс пропитки идет до тех пор, пока связующее не заполнит все свободное пространство формы [2]. Сигналом для прекращения пропитки является заполнение связующим (без пузырей воздуха) выходных трубок дренажной системы. После пропитки форму помещают в печь или пресс, где происходит отверждение детали [3, 4]. В случае использования в качестве связующего композиций холодного отверждения процесс фор-

мования проходит при нормальной температуре (рис. 1).

К преимуществам такого способа можно отнести отсутствие необходимости в дорогостоящем оборудовании, хорошие условия труда (отсутствует непосредственный контакт человека со связующим), возможность изготовления деталей сложной формы, возможность использования трехосно-армированных наполнителей, относительно невысокая стоимость процесса.

Наряду с преимуществами, у процесса пропитки под давлением есть недостатки, основными из которых являются длительность процесса и зависимость качества детали от правильности расположения трубок дренажной системы, а также, в отдельных случаях, конструктивная сложность и высокая стоимость оснастки.

Однако, несмотря на это, способ пропитки под давлением широко применяется в авиакосмической технике для изготовления таких деталей, как лопасти винто-вентиляторных двигателей, лопасти турбореактивных двигателей, монолитные обтекатели, элементы механизации крыла, различные детали сложной формы и т.д. [5].

Технология инфузионной пропитки под вакуумом (технология *VARTM*) по своей сути близка технологии *RTM*, однако, имеет ряд существенных отличий. Так, пропитка и формование детали происходит не в закрытой форме типа матрица/пуансон, а на оснастке с закрепленным на ней вакуумным мешком (рис. 2).

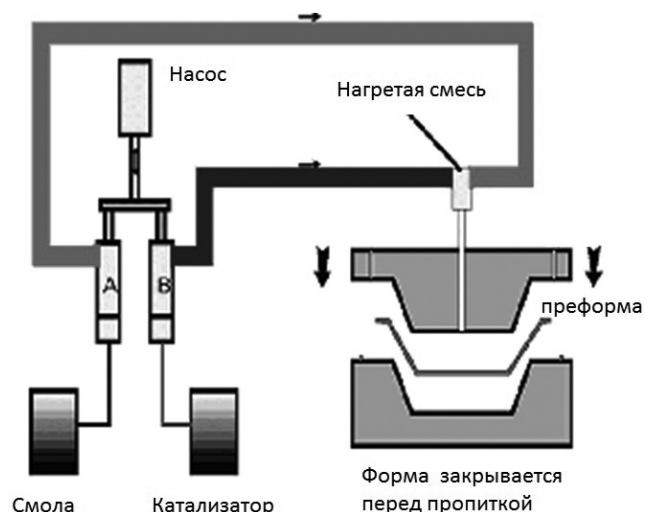


Рис. 1. Схема процесса пропитки под давлением (технология *RTM*)

Полимерное связующее закачивается в форму не за счет избыточного давления, а за счет разряжения, создаваемого под вакуумным мешком [1]. Указанные отличия позволяют существенно снизить затраты на подготовку производства конструкций за счет возможности применения более простой (конструктивно) и дешевой оснастки, отсутствия необходимости приобретения оборудования для подачи связующего в форму и т.д.

К основным недостаткам технологии вакуумной инфузии стоит отнести, в первую очередь, трудности воспроизводимости процесса, т.е. тщательную отработку технологии, позволяющей получать детали со стабильными геометрическими и физико-механическими характеристиками [6]. Это связано с тем, что формование происходит не в закрытой форме (как в случае использования технологии *RTM*), а под вакуумным мешком. Таким образом, на толщину детали будет влиять только объем связующего, закачанного под вакуумный мешок. Контролировать и задавать количество связующего, поступающего в заготовку, довольно затруднительно, так как на сегодняшний день механизмы влияния на процесс пропитки наполнителя связующим при технологии вакуумной инфузии мало изучены.

Тем не менее, в настоящее время технология вакуумной инфузии является главной альтернативой технологии контактного формования при изготовлении товаров народного потребления, деталей автомобилей, производстве лопастей ветрогенераторов, производстве судов. Также данная технология активно развивается

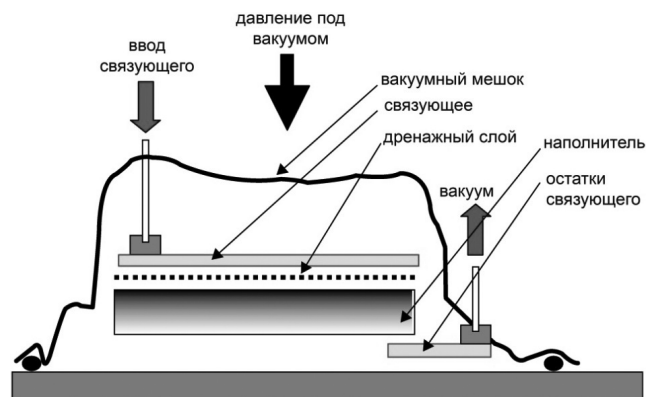


Рис. 2. Схема пропитки методом вакуумной инфузии (технология *VARTM*)

в авиационной отрасли. Так, компания Airbus разработала технологию изготовления методом инфузии грузовой двери транспортного самолета А-400М (длина 6,2 м, ширина 5,5 м) [7]. Ведущие мировые авиастроительные компании ведут научно-исследовательские работы, направленные на изучение возможности изготовления по технологии вакуумной инфузии силовых и особоответственных конструкций самолетов (таких как крыло, детали хвостового оперения и т.д.).

Помимо технологий пропитки под давлением и вакуумной инфузии применяется **технология пропитки пленочными связующими** (технология *RFI*). Так же, как и в технологиях *RTM* и *VARTM*, в указанной технологии процесс пропитки наполнителя связующим совмещен с процессом формования детали. Однако в случае технологии *RFI* пропитка наполнителя осуществляется не в продольном, а в поперечном направлении, что значительно сокращает путь, который необходимо преодолеть связующему, и время пропитки [1]. Суть способа *RFI* заключается в следующем:

- на оснастку выкладываются слои армирующего наполнителя и связующего в виде пленки. При этом выкладка может происходить как полойно, так и готовыми пакетами;
- формируется технологический пакет (дренажные и разделительные слои, вакуумный мешок и т.д.);
- проводится режим формования в печи под действием вакуума или в автоклаве при избыточном давлении (рис. 3).

На процесс пропитки армирующего наполнителя связующим в ходе процесса *RFI* влияет большое количество характеристик связующего и наполнителя. Так, структура армирующего наполнителя, тип используемого волокна, применяемое в ходе технологического процесса давление влияют на скорость и качество пропитки. Также на процесс пропитки влияют реологические свойства

связующего (уровень и профиль вязкости, жизнеспособность) и его химический состав.

Следует отметить основные недостатки технологии пропитки пленочными связующими. Одним из недостатков данной технологии являются достаточно жесткие требования к применяемому связующему по реологии. В связи с тем, что в трансверсальном направлении армирующий наполнитель имеет проницаемость во много раз меньшую, чем в продольном, связующее должно обладать достаточно низкой вязкостью в процессе пропитки. При этом вязкость связующего при нормальной температуре должна иметь высокое значение, обеспечивающее возможность существования связующего в виде пленки при нормальной температуре.

Вторым недостатком способа *RFI* является сложность компьютерного моделирования процесса пропитки [8, 9]. Это связано с тем, что в ходе пропитки растекание связующего происходит во всех трех направлениях и построение математической модели течения связующего в заготовке является весьма сложной задачей. В то же время с технологиями пропитки под давлением и вакуумной инфузии таких трудностей не возникает, так как течение связующего в ходе пропитки происходит только в двух направлениях, что заметно упрощает математическую модель описания данного процесса. Стоит отметить, что сегодня технологии компьютерного моделирования широко применяются при разработке оснастки и отработке технологий изготовления деталей способами *RTM* и *Vacuum Infusion* [10]. Применение ком-

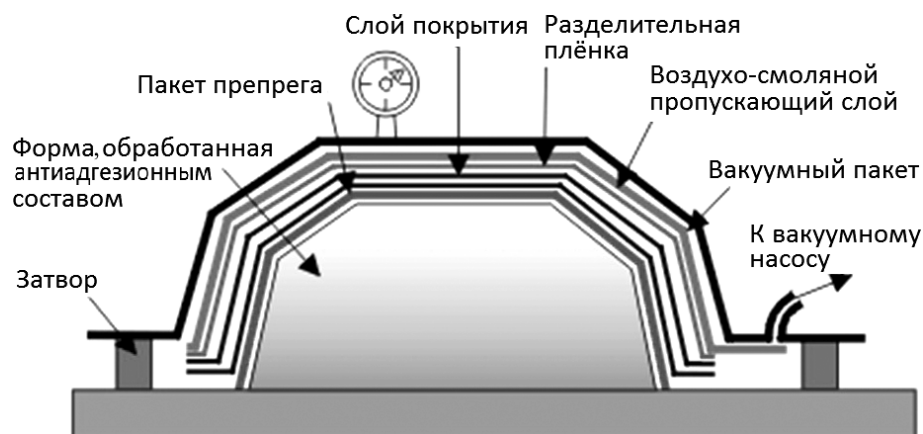


Рис. 3. Схема пропитки пленочным связующим (технология *RFI*)

пьютерного моделирования позволяет существенно сократить материальные и временные затраты на разработку технологии и освоение производства изделий из ПКМ.

При всех вышеописанных недостатках технология *RFI* обладает рядом несомненных преимуществ.

Так, ряд пленочных связующих, применяемых сегодня, обладает реологическими характеристиками, позволяющими изготавливать изделия из ПКМ вакуумным способом [11, 13]. Таким образом, отпадает необходимость в приобретении автоклава (стоимость которого может достигать до нескольких миллионов долларов) и дорогостоящей оснастки.

Вторым преимуществом технологии *RFI* является возможность использования заранее сформированных пакетов наполнителя — так называемых преформ [15]. Преформа может представлять собой несколько слоев армирующего наполнителя, уложенного под требуемыми углами, или многослойную мультиаксиальную ткань, изготовленную предприятием-производителем армирующих наполнителей. Таким образом, применение преформ позволяет снизить трудоемкость и продолжительность изготовления детали за счет сокращения цикла выкладки.

Также технология пропитки пленочными связующими позволяет использовать прошитые в трансверсальном направлении пакеты наполнителя, что повышает в получаемом пластике характеристики вязкости разрушения и стойкости к ударным воздействиям.

Еще одним несомненным преимуществом вышеуказанного способа получения деталей из ПКМ является возможность изготовления деталей с заданным объемным содержанием наполнителя в пластике и, как следствие, с заданными геометрическими и упруго-прочностными характеристиками. Это связано с тем, что связующее в виде пленки заранее укладывается на оснастку в требуемом количестве, что позволяет достичь в пластике заданного соотношения наполнитель/матрица. При этом для получения ПКМ с требуемыми характеристиками нет необходимости в использовании дорогостоящей формы закрытого типа (как в случае использования технологии *RTM*), обеспе-

чивающей необходимую толщину и геометрию детали. Для технологии *RFI* вполне подходят оснастки открытого типа, аналогичные применяемым для изготовления изделий из ПКМ способом вакуумной инфузии. Результаты сравнительного экономического анализа технологии *RFI* при использовании для формования автоклавного оборудования и печи по сравнению с традиционной препреговой технологией приведены в таблице [14].

Сравнительная оценка технологий пропитки пленочным связующим (*RFI*) при использовании различного оборудования для отверждения

Метод формования	Препрег	<i>RFI</i>	<i>RFI</i>
Оборудование, используемое для отверждения деталей из ПКМ	Автоклав	Автоклав	Печь
Суммарная трудоемкость изготовления, чел/ч: в том числе	10,233	4,941	4,941
Трудоемкость изготовления полуфабриката, чел/ч	1,333	0,111	0,111
Трудоемкость процесса выкладки и сборки технологического пакета, чел/ч	8,90	4,83	4,83
Энергозатраты, кВт/ч в том числе	624	601,67	61,67
Энергозатраты на изготовление полуфабриката, кВт/ч	90	1,67	1,67
Энергозатраты на формование, кВт/ч	480	600	60
Суммарные затраты, руб.	4 639,92	3 291,69	1 401,69

Указанные преимущества позволяют, по оценкам зарубежных ученых [15], добиться снижения стоимости изготовления детали из ПКМ более чем на 25% по сравнению с традиционной препрегово-автоклавной технологией при сохранении на том же уровне основных упруго-прочностных и эксплуатационных характеристик.

Для производства таких крупногабаритных конструкций, как балки и колонны линий электропередач, в результате проведенного анализа была выбрана технология инфузионной пропитки (технология *VARTM*). Конструктивные особенности данных изделий заключаются

в следующем: секции вертикальной опоры представляют собой гладкие конические оболочки, угол конуса образующей, около одного градуса, длина секций — до 12 м; траверса выполнена в виде профилированной балки, с открытым или замкнутым контуром сечения (прямоугольный бокс, двутавр и т.п.) длиной до 9 м. Исходя из проведенного предварительного расчета, установлено, что толщина оболочек данных строительных конструкции должна быть не менее 12...15 мм. Время всего цикла пропитки для таких крупногабаритных деталей при использовании технологии *VARTM* практически полностью определяется тем временем, которое требуется на приготовление вакуумного мешка, и зависит от квалификации и количества сборщиков. Общее время сборки вакуумного мешка для колонны размером 12 м при использовании 4 квалифицированных сборщиков составило 1,2 ч.

Использование методов прямого формования при изготовлении колонн линий электропередач из стеклопластика позволила снизить на 15% стоимость получаемых изделий, по сравнению с ранее используемыми методами ручной выкладки.

Отдельные результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке по ГК № 16.518.11.7077.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Advanced Fibre-Reinforced Matrix Products for Direct Processes.** Hexcel Corporation. Publication No. ITA 272a, 2007.
2. **Wood G., Frampton A.** TANGO LATERAL WINGBOX PLATFORM // Airbus UK Ltd. 2003. С. 26—34.
3. **Колосов А.Е., Репелис И.А., Хозин В.Г., Клявин В.В.** Пропитка волокнистых наполнителей полимерным связующим // Механика композитных материалов. 1988. № 3. С. 490—496.
4. **Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В.** и др. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением. // Мат. Межотрасл. научно-технич. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении», посвященная 100-летию со дня рождения А.Т. Туманова. 2009. С. 18.
5. **Richardson M.** Bombardier spreadsits wings // Aerospace manufacturing, 2010. С. 278—296.
6. **Karen Fisher Maden.** Autoclave quality outside the autoclave? // High-Performance Composites, 2006. С. 132—136.
7. **Black S.** Inside Manufacturing: A400M Cargo Door Out of the Autoclave // High-Performance Composites, 2007. С. 108—146.
8. **Park J., Kang M.K.** A numerical simulation of the resin film infusion process // Composite Structures. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2003. V. 60. N 4. С. 431—437.
9. **Sevostianov I., Verijenko V.E., Von C.J.** Klemperer mathematical model of cavitation during resin film infusion process // Composite Structures. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2009. V. 48. N 1. С. 197—203.
10. **Luděk Kovář** ESI Composites Simulation Suite. Few examples, advanced analysis and projects, 2010. 334 с.
11. **HexPly M36.** Product DataSheet, Hexcel Corporation. Publication N. FTU, 2007. 116 с.
12. **ACG MTM 44-1 Matrix Resin,** Advanced Composites Group Ltd., PDS1189/06.09/4, 2009.
13. **ACG MTM 45-1 Matrix Resin,** Advanced Composites Group Ltd., PDS1205/09.10/6, 2010.
14. **Тр. «ВИАМ»** по договору № 804-11-13 от 21.10.2011 в рамках выполнения государственного контракта № 16.523.11.3012. 438 с.
15. **Lang D.** Aerospace structures: current trends // Composites RTM infusion 2009. С. 228—242.

ВНИМАНИЕ!

Уважаемый читатель, Вы получили номер журнала с голограммой на первой стороне обложки. Это означает, что этот экземпляр журнала является оригинальным, выпущенным научно-техническим издательством ООО «Наука и технологии». Если голограмма отсутствует, экземпляр журнала — контрафактный. В этом случае убедительная просьба сообщить в издательство, в какой фирме был приобретен этот экземпляр журнала, по телефону (495) 223-09-10, факсу (499) 164-47-74 или e-mail: market@nait.ru.

Заранее благодарим за сотрудничество.