



УДК 678.8

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПКМ МЕТОДОМ RFI

М.М. Григорьев

Д.И. Коган

кандидат технических наук

О.Н. Твердая

Н.Н. Панина

Апрель 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№4, 2013 г.

М.М. Григорьев, Д.И. Коган, О.Н. Твердая, Н.Н. Панина

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПКМ МЕТОДОМ RFI

Представлены результаты исследования процесса получения ПКМ методом RFI. Приведены данные изменения пористости и качества поверхности образцов пластиков в зависимости от технологии формования.

Ключевые слова: *безавтоклавное формование, пленочное связующее, RFI, содержание связующего, пористость, толстостенные изделия, полимерные композиционные материалы.*

M.M. Grigoriev, D.I. Kogan, O.N. Tverdaya, N.N. Panina

ESPECIALLY BY MAKING PCM RFI METHOD

The results of study of the process for producing a polymer composite material by RFI. These changes are the porosity and surface quality of samples, depending on the plastic molding technology.

Key words: *out-of-autoclave processing, resin film, RFI, resin content, void content, thick-walled parts, polymeric composite materials.*

В настоящее время ведущие зарубежные и отечественные ученые активно ведут исследования, направленные на разработку материалов и технологий, позволяющих снизить затраты при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–3].

В ВИАМ проводятся научно-исследовательские работы, направленные на разработку безавтоклавных технологий изготовления ПКМ с целью снижения их стоимости. К числу таких технологий, с помощью которых можно без использования автоклава изготовить ПКМ с высоким уровнем упруго-прочностных свойств, относятся: вакуумное формование ПКМ – VaRTM пропитка под вакуумом (Vacuum assisted resin transfer molding) и RFI (Resin Film Infusion) и формование ПКМ при помощи пропитки под давлением – RTM (Resin transfer molding) [4].

Все вышеперечисленные технологии характеризуются тем, что процесс совмещения наполнителя со связующим происходит непосредственно в момент формования ПКМ, что позволяет использовать тканые преформы с различной схемой армирования. Однако технологии, предполагающие совмещение полимерного связующего и наполнителя непосредственно на оснастке открытого типа, такие как вакуумная инфузия, имеют существенный недостаток – это сложность контроля содержания связующего в готовом изделии, что может стать причиной разнотолщинности и существенного разброса физико-механических свойств. С целью устранения такого недостатка, для контроля содержания связующего в изделии, можно использовать две жесткие полуматрицы (технология RTM), что приведет к существенному аппаратному усложнению процесса [5, 6]. Метод RFI является компромиссным решением для устранения этого недостатка – он позволяет задавать и контролировать содержание связующего в получаемом ПКМ, но в то же время не требует использования сложных оснасток. Перспективная технология RFI (технология пропитки пленочным связующим), обеспечивающая снижение трудоемкости и энергоемкости процесса изготовления детали, активно используется за рубежом при производстве различных деталей авиационной техники (задний гермошпангоут, передняя кромка крыла и др.), в то время как в России она пока еще не нашла массового применения.

Связующие в виде пленки, используемые для изготовления изделий из ПКМ методом RFI, должны обладать определенными технологическими свойствами. Пленка связующего при комнатной температуре должна обладать необходимой контактной липкостью, обеспечивающей возможность фиксирования ее в процессе сборки технологического пакета. При этом липкость пленки не должна быть высокой, чтобы обеспечить возможность комфортной работы с ней. Пленка связующего должна быть достаточно эластичной для обеспечения возможности выкладки деталей двойной кривизны. Реология пленочного связующего должна обеспечивать формоустойчивость выложенной на оснастку заготовки (не допускается эффект растекания связующего по поверхности оснастки). В процессе пропитки вязкость связующего (и время нахождения при данной вязкости) должна обеспечивать качественную пропитку толстостенных заготовок [7, 8]. Суть метода RFI заключается в том, что к собранному пакету сухого наполнителя через жертвенную ткань или перфорированную пленку укладывается пленка связующего [9]. Далее сборка герметизируется и соединяется через фитили или мембрану с вакуумным мешком. Многочисленные эксперименты, проведенные авторами, показали, что практически все время сторона пластика, с которой происходит подача

связующего, имеет поверхность с обедненным содержанием связующего. Использование полупроницаемой мембраны не только со стороны мешка, но и со стороны оснастки позволило решить данную проблему, однако такой метод сборки мешка не всегда приемлем, так как не позволяет получить точный оттиск от оснастки. Кроме того, высокая стоимость мембраны не позволяет говорить о достаточной экономической эффективности данного метода. Авторами предложено скорректировать режим формования с целью повышения качества получаемых пластиков методом RFI без изменения схемы сборки технологического пакета [10].

Экспериментальная часть

Для корректировки режима формования ПКМ методом RFI выбрано эпоксидное пленочное связующее марки ВСЭ-20, разработанное в ВИАМ и предназначенное для его переработки по безавтоклавной пленочной технологии. В качестве наполнителя использована равнопрочная ткань 3101 (на основе углеродных волокон TohoTenax-E HTA 3к) производства фирмы «Porcher Ind.». Пленка связующего ВСЭ-20 изготовлена в ручном гидравлическом прессе из брикета с использованием ограничительной рамки из силиконовой резины. Полученная пленка укладывалась на стальную оснастку, поверх нее помещался пакет наполнителя размером 200×200 мм, состоящий из 33-х слоев ткани, обернутый с двух сторон жертвенной тканью. Собранный пакет обклеивается герметизирующим жгутом, с помощью которого зафиксирована полупроницаемая мембрана. На мембрану укладывается жертвенная ткань для обеспечения лучшего дренирования между мембраной и цулагой, поверх которой уложена цулага, обернутая в фторопластовую пленку. Далее помещается дренаж и собирается вакуумный мешок. Таким образом, изготовлено два идентичных технологических пакета. Процесс формования обоих пакетов проходил одновременно в печи. Первый пакет был подключен к вакуумной линии перед началом нагрева, второй пакет соединен с атмосферой. Затем оба пакета нагревали до температуры пропитки 105°C со скоростью 5°C/мин и выдерживали в течение 30 мин, после чего второй пакет также подключался к вакуумной линии. Затем оба пакета выдерживали дополнительно в течение 30 мин при температуре пропитки, после чего они отверждались по стандартному режиму для пленочного связующего ВСЭ-20. Изготовленные таким образом пластики исследовались на пористость с использованием метода гидростатического взвешивания (размер образцов 15×15 мм) [11]. Также проведены испытания на сдвиг методом изгиба короткой балки при трехточечной схеме нагружения [12]. Размеры испытываемых образцов составили: 10×10×50 мм; при

этом отношении расстояние между опорами l к толщине образца h составляло 5; скорость испытания составила 2 мм/мин. Определение сдвиговой прочности проводилось на испытательной машине Тиратест 2300. Данные по реологии связующего ВСЭ-20 получены при использовании ротационного вискозиметра «Брукфильда» LVDV-II+ и реометра Ar2000ex. Все экспериментальные значения, приведенные в таблице и на рисунках, получены путем усреднения результатов испытаний по 5–10 образцам.

Результаты и их обсуждение

Связующее ВСЭ-20 характеризуется тем, что при динамическом нагревании показатель его вязкости $\square 1$ Па·с достигается при температуре 105°C (рис. 1, а). Реологические свойства эпоксидного пленочного связующего марки ВСЭ-20 при изотермическом нагревании при 105°C (рис. 1, б) характеризуются показателями в интервале 0,5–0,7 Па·с, практически не меняющимися в течение более чем 1 ч выдержки. Этого времени достаточно для обеспечения инфильтрации связующего в направлении толщины преформы для полной пропитки пакета наполнителя по технологии RFI.

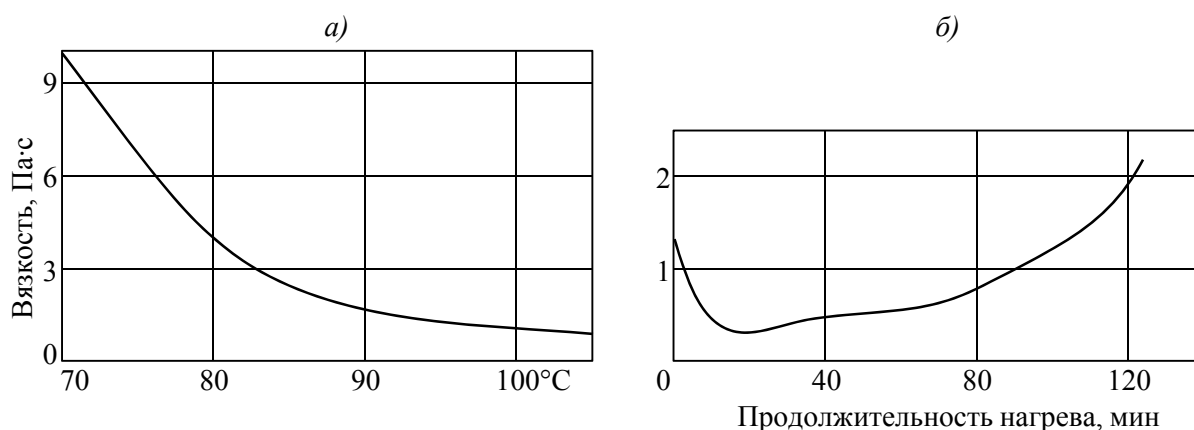


Рис. 1. Изменение кажущейся вязкости пленочного связующего марки ВСЭ-20 при динамическом нагревании со скоростью 5°C/мин (а) и изотермическом нагревании при температуре 105°C (б)

Наиболее реальную картину реологического поведения пленочного связующего при его переработке можно изучить, используя реометр, который осуществляет нагревание образца с постоянной скоростью, что соответствует реальному процессу формирования пластика. В ходе моделирования реального процесса пропитки при динамическом нагревании пленочного связующего со скоростью 2°C/мин на реометре, вязкость связующего опускается до отметки $\square 1$ Па·с и находится ниже этого порога ~ 40 мин [13].

Динамика изменения вязкости связующего ВСЭ-20 от температуры и времени приведена на рис. 2.

Как показано в статье [14], пористость материала зависит от капиллярного числа, которое, в свою очередь, зависит от скорости подачи связующего. Скорость пропитки пакета наполнителя методом RFI определяется вязкостью. В случае, когда формование ПКМ происходило под воздействием вакуума при комнатной температуре, вязкость связующего начинала падать и при этом постепенно происходила пропитка пакета наполнителя. Согласно данным [14], высокая вязкость связующего приводит к образованию микропористости. В случае, когда технологический пакет был подключен к вакуумной линии при температуре пропитки, связующее имело необходимую вязкость для пропитки пакета наполнителя.

Предположение о снижении пористости ПКМ, полученного методом RFI, за счет подачи формирующего давления при температуре пропитки подтверждают данные, приведенные в таблице. В обоих случаях пористость материала не превысила допустимое значение в 3% [15].

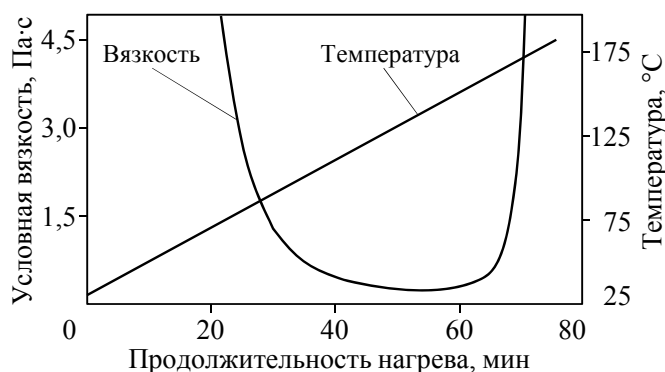


Рис. 2. Зависимость условной вязкости пленочного связующего от времени, определенная при динамическом нагревании на реометре со скоростью нагрева 2°C/мин

**Физические свойства углепластика на основе ВСЭ-20/P3101,
изготовленного по разным режимам подачи давления**

Свойства	Значения свойств углепластика, полученного по режиму	
	стандартному	измененному
Толщина монослоя, мм	0,323	0,321
Массовое содержание связующего, %	42,08	42,02
Объемная доля наполнителя, %	49,87	50,18
Плотность пластика, г/см ³	1,524	1,532
Объемное содержание пор, %	1,25	0,75

Сдвиговая прочность ПКМ является одним из основных свойств, зависящих от полимерной матрицы, по которой можно судить о качестве изготовленного материала [16]. В обоих случаях прочность при сдвиге методом короткой балки оказалась одинаковой и составила 69 МПа, что свидетельствует о незначительном влиянии низкой пористости (определенной в рамках данного эксперимента) на физико-механические свойства полученного пластика. Однако, как уже упоминалось выше, ПКМ, полученный по измененному режиму, имел более высокое качество поверхности по сравнению с пластиком, изготовленным по стандартному процессу (рис. 3).

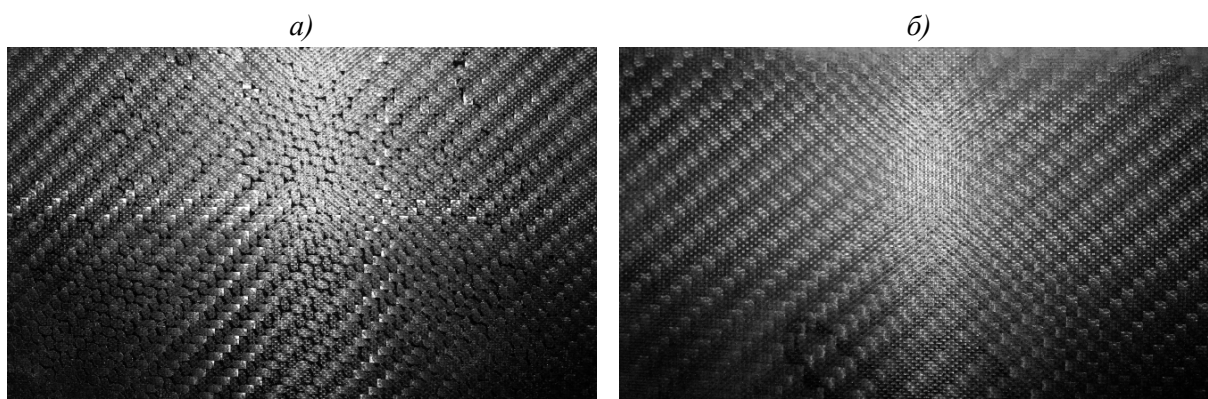


Рис. 3. Поверхность углепластика, полученного методом RFI по стандартному (а) и измененному режимам (б)

Полученные данные позволяют повысить качество ПКМ, изготавливаемых по технологии RFI без применения полупроницаемой мембраны с двух сторон, за счет подачи формирующего давления на технологической стадии пропитки пакета наполнителя. В первом приближении, изменение режима формования не повлияло на прочностные свойства полученных образцов, однако позволило снизить пористость более чем в 1,5 раза, а также повысить качество поверхности готового пластика, что делает его более пригодным для дальнейшего использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года /В сб. Авиационные материалы и технологии. Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 7–17.
2. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 231–242.
3. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим //Композиционные материалы. 2011. №11. С. 2–6.
4. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
5. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 513 с.
6. Крыжановский В.К. Производство изделий из полимерных материалов. С.-Пб.: Профессия. 2008. 460 с.
7. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 63–66.
8. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения /В сб. Авиационные материалы и технологии. Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 260–265.
9. Коган Д.И. Технология изготовления полимерных композиционных материалов способом пропитки пленочным связующими: Автореф. дис. канд. технич. наук. 2011. 26 с.
10. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
11. ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы).

12. ОСТ1 90199–75. Материалы полимерные композиционные. Метод определения прочности при сдвиге путем испытания на изгиб.
13. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии //Российский химический журнал. Т. LIV. Материалы для авиакосмической техники. 2010. С. 63–67.
14. Котов В.В., Пещеренко Е.С. Комплекс для разработки и оптимизации технологий пропитки композитных конструкций //Аэрокосмический курьер. 2012. №3–4. С. 74–76.
15. Bob Griffiths. Innovative use of international supplier base to revolutionize aircraft manufacture //High-Performance Composites. 2005.
16. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ /В сб. Авиационные материалы и технологии. Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 292–301.