

УДК 678.8

*П.Н. Тимошков¹, А.В. Хрульков¹, Л.Н. Язвенко¹, М.Н. Усачева¹***КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ БЕЗАВТОКЛАВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48

Рассматриваются преимущества технологии безавтоклавного формования по сравнению с автоклавным формованием. Использование автоклава обеспечивает качественное отверждение полимерной матрицы, но ввиду дороговизны аппарата широкое внедрение получил безавтоклавный метод. Приводится схема формования, анализируются свойства марок препрегов и смол различных производителей для безавтоклавного формования, свойства волоконных наполнителей, процесс отверждения препрега с помощью безавтоклавного формования.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, безавтоклавное формование, пористость, вязкость, связующее, смолы.

*P.N. Timoshkov¹, A.V. Khrul'kov¹, L.N. Yazvenko¹, M.N. Usacheva¹***COMPOSITE MATERIALS
FOR NON-AUTOCLAVE TECHNOLOGY (review)**

The advantages of non-autoclaved molding technology in comparison with autoclave molding are considered in this article. The use of an autoclave ensures a high-quality curing of the polymer matrix, but because of the high cost of the apparatus, a non-autoclave method is widely used. Also, a molding scheme is given, the properties of the prepregs and resins for non-autoclaved molding of various manufacturers, the properties of the fiber fillers, the process of consolidating the prepreg with non-autoclave curing are analyzed.

Keywords: polymeric composite materials, non-autoclave molding, porosity, viscosity, binder, resins.

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

30 ноября 2017 г. во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) прошла II Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», где были сделаны доклады по современным материалам и технологиям, которые позволяют изготавливать детали и агрегаты для авиационной техники, судостроения и гражданских отраслей. Предусмотрены выполнение работ по разработке новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) для перспективных конструкций, а также направления по созданию новых связующих для ПКМ, новых конструкционных материалов со свойствами, позволяющими использовать их при изготовлении деталей и агрегатов самолетов нового поколения, создания «умных» конструкций и использования моделирования процессов изготовления, использования оптоволоконной техники для самодиагностики конструкций в процессе эксплуатации. Традиционные технологии предусматривают изготовление деталей из ПКМ методом предварительной выкладки заготовки детали на оснастку, затем сборку

технологического пакета с использованием антиадгезионных слоев, жертвенных слоев, дренажных слоев, вакуумной пленки и других технологических материалов и приспособлений [1–5]. Затем производится формование в автоклаве. Использование автоклава обеспечивает качественное отверждение полимерной матрицы с минимальной пористостью и требуемой шероховатостью поверхности, так как качество поверхности зависит от качества поверхности оснастки. Однако использование автоклава предусматривает строительство для него специальных помещений, отвечающих требованиям правил установки и эксплуатации сосудов, работающих под давлением. При этом стоимость оборудования может быть ~50 млн руб. за небольшой автоклав с диаметром рабочей зоны 1 м и длиной 2 м, а большой промышленный автоклав может стоить 10 млн долларов и более. Поэтому широкое внедрение ПКМ требует разработки материалов и технологий безавтоклавного формования [6–8].

Данный аналитический обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», раздел 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9–13].

Материалы для безавтоклавного формования

Применение композиционных конструкций в авиа- и ракетостроении было начато еще в 1960-х годах. Изготовление деталей осуществлялось методом послойной выкладки или намотки с последующим формованием в автоклаве. В настоящее время применение композиционных материалов в деталях оперения и фюзеляжа самолетов, в спортивных товарах, а также некоторых других отраслях стало обычным явлением.

Особое место в качестве армирующих элементов занимают углеродные волокна, так как они имеют высокую жесткость и прочность и при этом обеспечивают весовую эффективность. В настоящее время композиционные конструкции из углепластика используют в авиа- и судостроении, строительстве, при изготовлении спортивных товаров и в медицине, в ветроэнергетике и автомобилестроении. Основным препятствием к широкому внедрению углепластиков является их высокая себестоимость и отсутствие специалистов по проектированию, изготовлению и эксплуатации конструкций на их основе, а также последующей утилизации.

С учетом увеличивающихся объемов производства конструкций из композиционных материалов возрастает необходимость разработки технологий безавтоклавного формования. В последнее время возник повышенный интерес к технологии использования препрегов для безавтоклавного формования и методов инфузии. Так, в РФ изготавливаются детали крыла самолета методом инфузии с последующим формованием в термопечи. При испытаниях в ЦАГИ кессон крыла разрушился при нагрузке 131%, что подтверждает: с одной стороны, возможность использования безавтоклавной технологии изготовления углепластиков для ответственных конструкций, с другой – разброс прочностных характеристик конструкций из ПКМ может быть достаточно высоким, а из-за отсутствия опыта (как при проектировании, так и при изготовлении) требуется провести многочисленные исследования с целью понимания правильного использования углепластиков. Фирмы «Эрбас» и «Боинг» внедряют в серийное производство автоклавный метод отверждения – на созданных производствах в Европе, США и Японии используются автоклавы больших размеров, позволяющие формовать элементы фюзеляжа и оперения самолетов А-350 и 787 (рис. 1 и 2).

Одновременно в мире проводятся многочисленные работы с целью внедрения в производство безавтоклавных технологий. В табл. 1 представлены марки препрегов для безавтоклавного формования.



Рис. 1. Формование панелей крыла самолета А-350



Рис. 2. Формование секции фюзеляжа самолета 787

Таблица 1

Марки препрегов для безавтоклавного формования

Производитель (фирма)	Марка препрега	Смола	Назначение
ACG (now Cytec)	MTM44-1	Эпоксидная смола	Отвержденная эпоксидная смола, предназначенная для средней температуры формования; используется фирмой «Эрбас» для вторичных и третичных структур
	MTM45-1	Эпоксидная смола	Эпоксидная смола с более низкой температурой формования, оптимизированная для повышенных характеристик сжатия
	MTM45-1FR	Эпоксидная смола	Вариант смолы MTM45-1, оптимизированный для замедления распространения пламени при горении
	MTM47-1	Эпоксидная смола	Вариант смолы MTM45-1, оптимизированный для горячих/влажных систем – до температуры 130°C
Cytec	Cycom 5320	Эпоксидная смола	Отвержденная эпоксидная смола, предназначенная для применения в первичной структуре
	Cycom 5320-1	Эпоксидная смола	Вариант эпоксидной смолы марки 5320, разработанной для увеличения срока службы
Gurit	Spint ST94	Эпоксидная смола	Односторонний препрег для деталей, требующих сопротивления удару и образованию микротрещин
Hexcel	Hexply M56	Эпоксидная смола	Высокоэффективная эпоксидная система
Toray	2510	Эпоксидная смола	Отвечает требованиям для использования в первичной структуре гражданской авиации
Tencate	BT250E	Эпоксидная смола	Эпоксидная стандартная система, используемая в самолетах фирмы Citrus и беспилотных летательных аппаратах, в том числе для лопастей вертолета с повышенным сопротивлением усталости
	TC250	Эпоксидная смола	Второе поколение систем с увеличенной прочностью и высокой рабочей температурой
	TC275	Эпоксидная смола	Третье поколение систем с большей влажностойкостью и отверждением при 135°C
	TC350-1	Эпоксидная смола	Третье поколение систем с увеличенным сроком службы (45+ дней), высокой прочностью и способностью к отверждению при 135°C с постотверждением при 177°C
	TC420	Сложный эфир цианата	Высокая температура системы – рабочая температура до 315°C
	TC800 BMI+	Бисмалеимид	Высокотемпературный закаленный бисмалеимидный препрег, разработанный для безавтоклавного отверждения
Henkel		Бензоксазин	Препрег основан на смеси эпоксидированной бензоксазиновой смолы

Первоначально для безавтоклавного формования применяли системы смол, которые отверждались при температуре 60°C и обладали относительно высокой вязкостью. Это вызывало повышенную пористость формируемых деталей и наличие непропитанных участков препрега. Для повышения теплостойкости применяли последующую термообработку – постотверждение. Это позволяло использовать дешевую оснастку и повышать точность размеров благодаря меньшему расширению оснастки при нагреве. Однако такие недостатки, как относительно высокая пористость, особенно при высоком содержании волокна; низкая жизнеспособность (как правило, около одной недели) и невысокие физико-механические свойства перевешивали эти преимущества. Современное поколение связующих для безавтоклавного формования позволяет использовать комбинации смол, что обеспечивает необходимый уровень вязкости и низкую пористость.

Основное требование для деталей с низкой пористостью, отверждаемых по технологии безавтоклавного формования, – это удаление воздуха, захваченного во время укладки, и летучих продуктов, образующихся при нагреве. С этой целью препреги изготавливают «воздухопроницаемыми» с частично пропитанными жгутами, состоящими из сухих и обогащенных смолой участков (рис. 3, а) [14]. Сухие области, иногда обозначаемые как «спроектированные вакуумные» каналы, образуют относительно проницаемую сосудистую сеть, которая обеспечивает миграцию газа к границам заготовки детали на ранней стадии обработки [15].

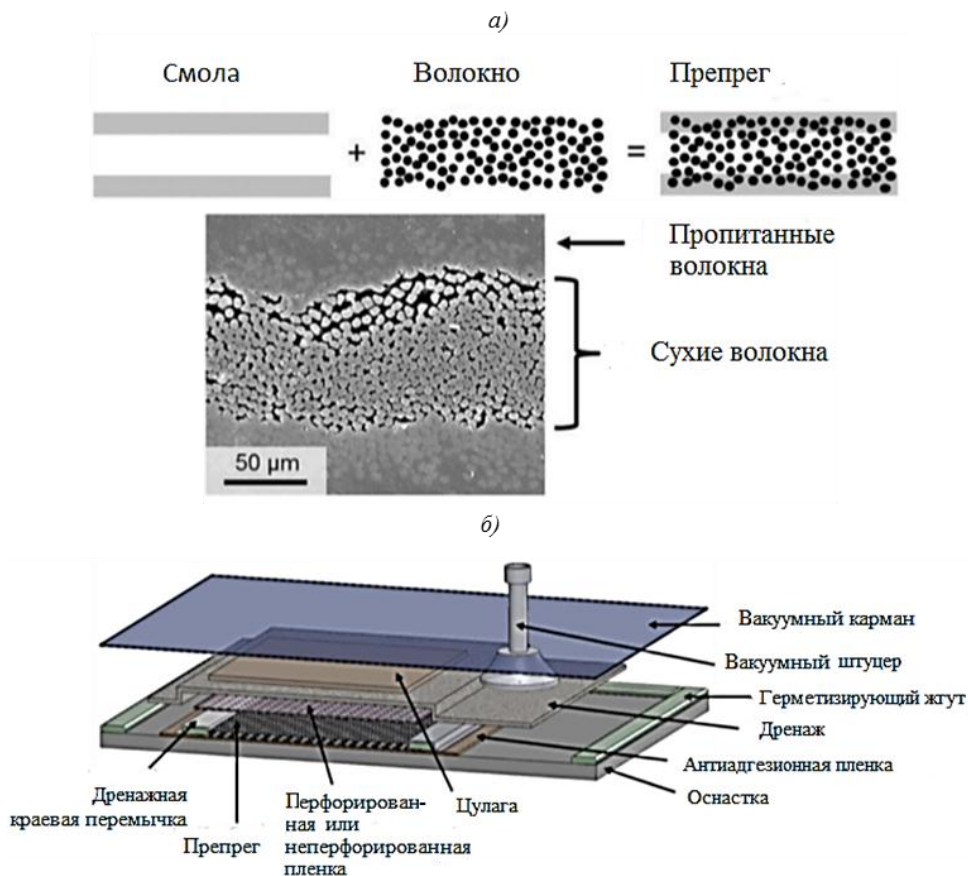


Рис. 3. Схема безавтоклавного формования с СЕМ микрофотографией очищенных воздухом каналов препрега (а) и схема сборки пакета для безавтоклавного отверждения (б)

Для того чтобы газы могли выходить из препрега, сборка вакуумного мешка должна включать проницаемые границы, которые соединяют заготовку с дренажом,

не допуская чрезмерного вытекания смолы. Для исключения газа из внутренней части заготовки, эти границы имеют форму сухих стекловолоконных нитей или других «дышащих» слоев, расположенных вокруг периметра заготовки деталей. Для удаления газов поперек толщины слоев могут быть использованы перфорированные пленки или воздухопроницаемые мембраны. Общая компоновка безавтоклавного отверждения с указанием соответствующих расходных материалов представлена на рис. 3, б.

Циклы отверждения, используемые для обработки препрегов безавтоклавным способом, также имеют заметные отличия от циклов, используемых для материалов, полученных в автоклаве.

Во-первых, поскольку давление для удаления воздуха имеет большое значение, вакуумный мешок должен гарантировать полную герметичность.

Во-вторых, выдержка под вакуумом при комнатной температуре должна быть от нескольких часов для небольших деталей и более 16 ч для крупногабаритных. Это требуется, чтобы удалить газы, захваченные во время выкладки.

В-третьих, системы смол препрега предназначены для отверждения при температуре между 80 и 120°C, а также последующего постотверждения в вакуумном мешке или в свободном состоянии при температуре до 177°C для полного отверждения связующего.

Итак, основным требованием при производстве безавтоклавным методом деталей без пор и пустот является обеспечение открытой пористости в самом препреге посредством частичной пропитки. Связь между пропиткой препрега и пористостью впервые установлена Б. Торфиннсоном и Т. Бирманном в 1980-х годах. В то время требовалось изготавливать толстостенные детали автоклавным методом, а долговременное прерывистое вакуумное уплотнение и неполная пропитка препрега позволили достичь низкой пористости [16].

В результате показано, что с помощью сухих участков в пределах каждого слоя препрега можно удалять захваченный воздух и другие летучие соединения, прежде чем при нагреве произойдет размягчение смолы и окончательная пропитка наполнителя.

Впоследствии более подробно рассматривалась степень пропитки. Во-первых, ученые формально определили этот параметр как отношение насыщенного смолой объема наполнителя к общему объему препрега и предложили метод ртутной порометрии для его измерения. Затем предоставили экспериментальные данные о соотношении степени пропитки с качеством панели. Для тех же смоляных и волокнистых материалов панель из препрега со степенью пропитки, равной 60%, не содержала пустот, тогда как при степени пропитки 93% образовывались значительные межслойные пустоты. При зарегистрированной промежуточной степени пропитки, равной 82%, получили как высокий, так и низкий уровень пористости – в зависимости от качества вакуума и времени выдержки под давлением. Частично пропитанные препреги, разработанные Б. Торфиннсоном и Т. Бирманном, назывались многослойными слоистыми препрегами, предназначенными для толстостенных деталей [17].

Более десяти лет спустя после этой первоначальной публикации появилась статья, в которой были представлены препреги для вакуумного формования. В этой работе технология производства препрегов для толстостенных пластиков использовалась при разработке этих материалов первого поколения для безавтоклавного формования – фирмой Cytec Engineered Materials (в настоящее время – Cytec Industries). В качестве демонстрации при исследовании получили две панели с использованием идентичных систем смол и армирующих волокон варьированием только степени пропитки препрега. Обе панели отверждались с использованием вакуумных мешков без автоклава.

В традиционном полностью пропитанном препреге содержание пустот в образце превышало 5%, тогда как в недопропитанном многослойном препреге пустот почти не было (рис. 4).

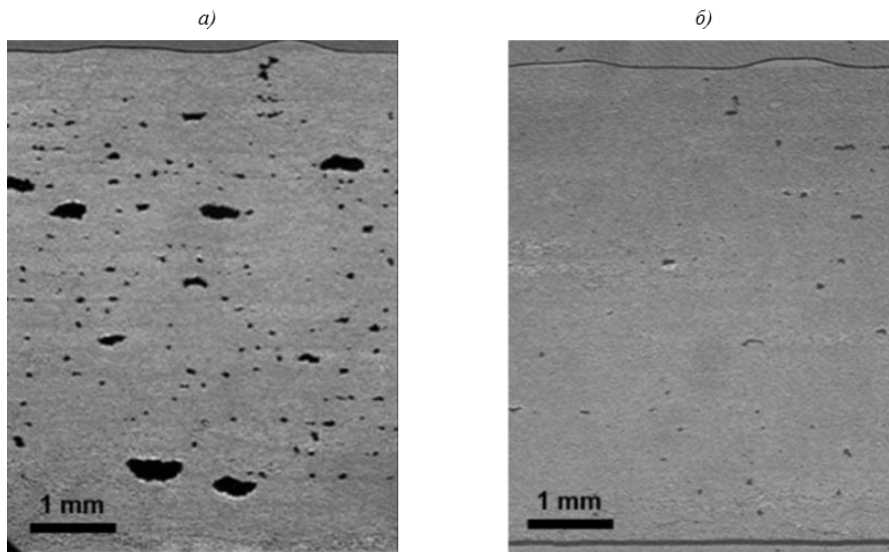


Рис. 4. Структура образцов, отвержденных без автоклава, с использованием обычного препрега (а) и толстого многослойного слоистого недопропитанного препрега – предшественника препрегов для безавтоклавного формования (б)

Другие производители препрегов использовали аналогичные приемы, используя немного отличающийся подход, – например, в фирме Gurit разработан класс препрега, известный как Sprint, путем создания сэндвич-пленки из двух слоев сухого волокна, обеспечивающих удаление воздуха, с обеспечением небольшого прилипания к одной из поверхностей для удобства сборки пакета. Показано, что фирма получает детали с низкой пористостью только под вакуумом, благодаря воздушным путям в сухих волокнах.

К. Ридгард объясняет, что системы препрегов для безавтоклавного отверждения предназначены для того, чтобы оставаться относительно вязкими на ранних стадиях цикла отверждения, препятствовать проникновению смолы и обеспечить достаточную площадь для удаления воздуха.

Поскольку вакуум используется для удаления воздуха из систем при безавтоклавном отверждении, а время измеряется в часах или днях, крайне важно, чтобы вязкость смолы препятствовала «холодному потоку», который может преждевременно запечатывать пути удаления воздуха. Однако вязкость должна также обеспечивать достаточный поток связующего при температуре отверждения, чтобы полностью пропитывать препрег. Кроме того, Дж. Бойд и Р.К. Маскелл утверждают, что для торможения образования и роста пузырьков при низких давлениях уплотнения как вязкие, так и эластичные характеристики препрега должны соответствовать конкретным параметрам обработки [14].

В целом развитие реологических свойств смол для безавтоклавного отверждения должно уравнивать уменьшение пустот, вызванных захваченными газами и недостаточным потоком связующего.

Некоторые авторы исследовали аспекты микроструктурного состояния препрега для безавтоклавного отверждения. Например, фирма Cytac разработала модели полимерной матрицы Cusom 5320-1, для которых используются экспериментальные данные дифференциальной сканирующей калориметрии и реометрический динамический анализ.

С.А. Солтани и др. разработали аналогичный режим для системы Cytec Sycum 5320 на основе измерений дифференциальной сканирующей калориметрии и существующей модели кинетики отверждения. Разработанные уравнения предсказывали степень отверждения при изотермических условиях, но должны были быть адаптированы для отдельных ступенчатых циклов отверждения.

Наконец, Д. Ким и др. охарактеризовали термохимические свойства системы Cytec Sycum 5320-1. Эти исследования подчеркивают сходство между системами смол препрега для безавтоклавного отверждения. Эти смолы демонстрировали кинетику отверждения с начальным увеличением скорости отверждения, за которым следует возможное снижение скорости отверждения, связанное с переходом на механизмы, основанные на диффузии. Промежуточные температуры (от 80 до 120°C) повышали вязкость смолы, которая достигала полной полимеризации, но максимальная степень отверждения требует более высокотемпературного постотверждения. Результаты реологических исследований для вышеприведенных систем показали, что минимальная вязкость изменяется с ~1 до 10 Па·с – для динамических циклов и с 1 до 100 Па·с – для изотермических условий [14].

Дж. Кратц и П. Хуберт также сравнили две смолы для безавтоклавного отверждения – МТМ45-1 (АСГ) и Сycum 5320 (Cytec) – с автоклавной системой смолы Нехcel 852 фирмы Нехcel. Как и ожидалось, обе смолы для безавтоклавного отверждения были более реакционноспособными, чем автоклавная система смолы в диапазоне от 80 до 140°C, так как последняя предназначена для отверждения при температуре 177°C. Сравнение трех смол – двух безавтоклавного (Сycum 5320-1 (Cytec) и МТМ45-1 (АСГ)) и одной для автоклавного (НехPly 8552 (Нехcel)) отверждений (рис. 5) – показывает, что препрег для автоклава менее реакционноспособный и менее вязкий при большей части времени выдержки при температуре отверждения 121°C. Ни одна из этих систем смол не отверждается полностью после 3 ч пребывания при 121°C. Две системы для безавтоклавного отверждения предназначены для отверждения при температуре 140°C, в то время как смола для автоклава предназначена для отверждения при температуре 177°C [18].

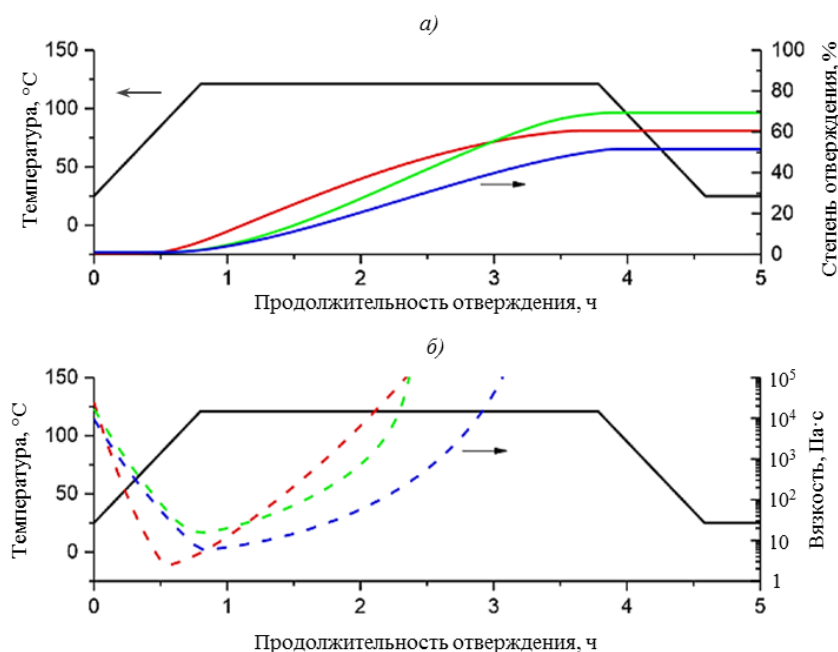


Рис. 5. Сравнение эволюции степени отверждения (а) и вязкости (б) для смол фирмы Cytec марки Сycum 5320-1 (—), фирмы АСГ марки МТМ45-1 (—) и фирмы Нехcel марки НехPly 8552 (—)

Из-за снижения давления обработки, смолы для безавтоклавного отверждения и препреги восприимчивы к воздействию влаги из окружающей среды. Л.К. Груненфельдер и С.Р. Натт рассмотрели эффект поглощенной влаги и показали, что воздействие высокой относительной влажности при выкладке может уменьшить время гелеобразования. В этой работе промышленную смолу для безавтоклавного отверждения МТМ44-1 фирмы АСG выдерживали в течение 24 ч при 35°C и различных уровнях влажности. Увеличение влажности окружающей среды с 50 до 90% уменьшило время гелеобразования со 160 до 130 мин.

Авторы также рассмотрели влияние времени выдержки на кинетику отверждения и липкость препрегов марки Cусom 5320 фирмы Cytec. Данные модульной дифференциальной сканирующей калориметрии (MDSC) показали, что увеличение времени выдержки уменьшает теплоту реакции и увеличивает отверждение до конечной температуры стеклования (T_c) квазилинейным образом.

В последующей публикации Л.К. Груненфельдер и С.Р. Натт применили сканирующую калориметрию для мониторинга отверждения двух других систем – Cусom 5320-1 (фирма Cytec) и МТМ44-1 (фирма АСG), которая показала, что температура стеклования является надежным показателем для отслеживания продолжительности отверждения препрега. Так, более 56 дней температура стеклования препрега увеличивалась с ~0 до ~(20–40)°C, а степень отверждения – с 0 до 0,1–0,3 в зависимости от материала [19].

Свойства волоконных наполнителей

В научной литературе содержится мало публикаций по исследованию волокон, используемых в препрегах для безавтоклавного отверждения. Однако, как объяснили Дж.Дж. Бонд и др., разработка формообразующих смол и препрегов для безавтоклавного отверждения отличается широким, но стандартным разнообразием волоконных наполнителей.

Объемная доля волокна в отвержденных слоях определяется кривой уплотнения волокна и распределением нагрузки между слоями волокна и смолой при гелеобразовании. Во время безавтоклавной обработки препрега давление уплотнения, воздействующее на слой, в идеальном случае постоянно и равно давлению внешней среды, и, наоборот – при обработке в автоклаве приложенное давление в несколько раз выше и теоретически может быть скорректировано для изменения конечной объемной доли волокна. По этим причинам неудивительно, что отмечаются небольшие различия в толщине и объемной доле волокон в частях, отвержденных из одного и того же материала в автоклаве и вне его. Объемная доля волокна ~60% легко достижима у препрегов для безавтоклавного отверждения и является преимуществом по отношению ко многим методам безавтоклавного отверждения, в том числе на основе инфузии [14].

Процесс отверждения препрега при формовании

Исследования процесса отверждения препрега обычно связаны с поведением трех фаз препрега: волокна, смолы и пустот – во время обработки, а также с его состоянием в конце отверждения. Для препрегов для безавтоклавного отверждения эти явления включают удаление воздуха, сжатие смолы, уплотнение слоя волокон и образование пустот. Процесс отверждения препрега при безавтоклавном отверждении схематически показан на рис. 6.

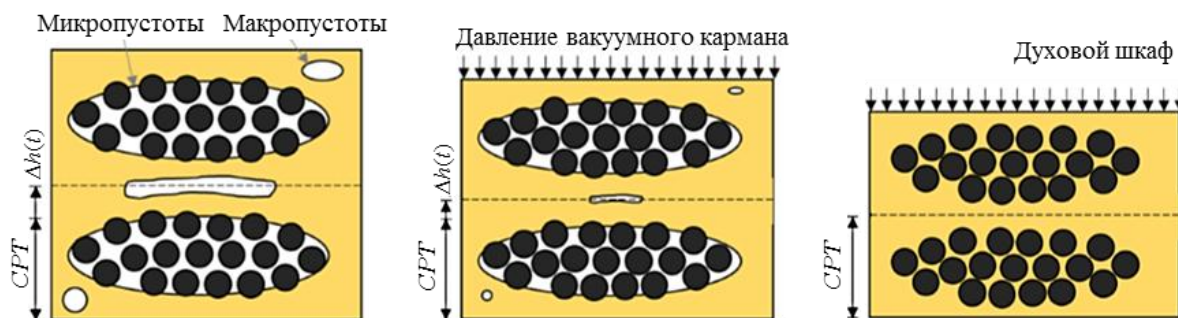


Рис. 6. Схема отверждения препрега при формовании – показаны единичные ячейки, состоящие из жгутов, окруженных смолой с микропустотами в центре жгута и макропустотами в области, заполненной смолой (CPT – толщина монослоя указывает на толщину отвержденного слоя)

Первоначально после укладки заготовки препрег состоит из неотвержденных частично пропитанных слоев. Каждый слой состоит из пучков волокон (или волоконных жгутов), окруженных связующим, микропор сухих жгутов (между отдельными волокнами) и макропустот в обогащенных смолой областях, расположенных вокруг жгутов. Как только создается вакуум, воздух удаляется через сухие жгуты, макропустоты уменьшаются, а слой волокон уплотняется. Однако жгуты остаются частично сухими. Когда температура повышается, смола постепенно проникает в сухие зоны жгутов, чтобы образовалась (в идеале) беспористая микроструктура (для жгутов с обжатием может возникнуть некоторый поток смолы вдоль направления волокна).

Удаление воздуха из препрегов

Э.Р.Э. Арафат и др. описывали удаление воздуха из препрегов как однонаправленный поток сжатого газа через проницаемую пористую среду [14].

Продолжительность удаления воздуха увеличивается квадратично с длиной детали и линейно уменьшается в зависимости от проницаемости слоя. Эти соотношения показывают, что если, например, расстояние, которое должен пройти воздух через препрег, длиннее в 2 раза (из-за более длинного слоя или непроницаемых краев), то требуется в 4 раза больше времени для удаления воздуха.

Л.К. Груненфельдер и С.Р. Натт использовали метод понижающего давления для оценки проницаемости однонаправленных лент марки Sycor 5320. Однонаправленный материал показал бóльшую проницаемость вдоль направления волокна, где траектория для удаления воздуха является прямой, а проницаемость в 1,5 раза меньше в направлении 90 град (перпендикулярно волокнам) [19].

Например, согласно модели Э.Р.Э. Арафата и др., при длине детали 1 м, для которой проницаемость в плоскости составляет 10^{-14} м², удаление 90% воздуха занимает около 30 ч.

В табл. 2 показана проницаемость для различных систем материалов для безавтоклавного отверждения (средний показатель и проницаемость при комнатной температуре, сообщаемая в научной литературе). Данные, представленные для различных препрегов, показывают различие на величину третьего порядка между показателем и промежуточным значением.

Таблица 2

Проницаемость для различных систем материалов безавтоклавного отверждения				
Направление армирующего наполнителя	Производитель	Смола	Слой волокна	Проницаемость, м ²
Вдоль волокна	ACG	MTM45-1	5HS	$3,3 \cdot 10^{-14}$
	Cytec	5320	5HS	$8,5 \cdot 10^{-15}$
	Cytec	5320	PW	$7,3 \cdot 10^{-15}$
	Среднее значение			$1,6 \cdot 10^{-14}$
Трансверсальное	ACG (now Cytec)	MTM45-1	5HS	$1,0 \cdot 10^{-18}$
	Cytec	5320	5HS	$1,6 \cdot 10^{-17}$
	Cytec	5320	PW	$6,4 \cdot 10^{-17}$
	ACG	VTM264	UD	$5,0 \cdot 10^{-18}$
	Среднее значение			$2,5 \cdot 10^{-17}$

Уплотнение слоев волокон, инфильтрация смолы и последующее удаление сухих и смолистых достаточно больших участков препрегов проанализированы учеными с самых разных точек зрения. Результаты показывают, что смола перетекает в большие межжгутовые макропространства, что приводит к возникновению микроструктуры сухих жгутовых ядер и окружающих областей, обогащенных смолой. Затем смола затекает в небольшие внутрижгутовые микропоры, и пропитка завершается (рис. 6). Значительное влияние температуры (или вязкости смолы) на продолжительность течения смолы продемонстрировано для изученной смолы марки Sycot 5215 – проникновение при температурах 50 и 80°C соответствует времени пропитки в течение 6 и 48 мин соответственно [20].

Заключения

Препреги для безавтоклавного отверждения позволяют изготавливать качественные детали под вакуумным давлением с использованием обычных печей или других неавтоклавных установок. Этот класс материалов имеет частично пропитанную микроструктуру, которая способствует удалению газа, а также подавляет образование дефектов на начальных стадиях обработки до полного насыщения наполнителя смолой во время отверждения.

Удаление воздуха, уплотнение волокнистого слоя, течение смолы и уменьшение пустот (или их разрушение) – это явления, которые способствуют уплотнению препрега и зависят от сочетания факторов, которые включают свойства составляющих волокон и смолы, начальное состояние препрега, параметры отверждения, такие как температура, качество вакуума, а также такие характеристики деталей, как геометрическая сложность и размер.

Исследования продемонстрировали, что высококачественные детали могут быть успешно изготовлены в соответствующих условиях. Однако эти исследования также показали, что обработка препрега для безавтоклавного отверждения может привести к неприемлемому качеству изделия, если ключевые параметры отклоняются от их допустимого диапазона.

Обработка безавтоклавным отверждением уменьшает затраты и воздействие на окружающую среду (по сравнению с традиционными методами) из-за уменьшения энергии, потребляемой во время отверждения. Однако необходимы дополнительные исследования и разработки для улучшения устойчивости процесса, а также следует полностью оптимизировать обработку с помощью безавтоклавного отверждения до уровня промышленного производства.

Широкое внедрение препрегов для безавтоклавного отверждения в индустрию композиционных материалов и их прорыв в промышленности со временем станут очевидными. Однако обработка вне автоклава представляет собой большой сдвиг в изменении технологии для производства передовых композитов – препрегов для безавтоклавного отверждения с обеспечением такого же качества, как при использовании автоклава.

Первые несколько десятилетий при производстве коммерческих препрегов для безавтоклавного отверждения основное внимание уделялось разработке материалов и методов для достижения желаемого качества, производительности и надежности. В настоящее время внимание переключается на стратегии для более быстрого, более эффективного и экологически безопасного производства. Препреги для безавтоклавного отверждения создаются как высокопроизводительные структуры, требовавшие ранее дорогостоящего и сложного оборудования, и будут производиться в различных условиях с более низкой стоимостью организации производства и оснастки. Тем не менее продолжают использоваться и традиционные автоклавные методы.

Объемы производства узкофюзеляжных самолетов более чем в 3 раза больше, чем объемы производства широкофюзеляжных самолетов; темпы производства, необходимые для удовлетворения этого спроса, будут невозможны при формовании деталей в автоклавах. Поэтому потребуются альтернативные методы производства для перехода на односекционный самолет из композитных конструкций. Одной из таких альтернатив является обработка композиционных материалов с помощью безавтоклавного отверждения.

Кроме того, для других отраслей промышленности способность производить композиты без автоклава может значительно снизить экономические барьеры, связанные с покупкой и эксплуатацией автоклавов, и позволит использовать композиционные материалы вместо металлов. С помощью безавтоклавного отверждения возможен также ремонт в полевых условиях с высоким микроструктурным качеством.

В настоящее время существует ряд неавтоклавных методов: формование в прессах, вакуумная инфузия и пултрузия, поперечная пропитка и др. Каждый метод имеет преимущества и недостатки и подходит для конкретных типов материалов и геометрических форм, различных требований к качеству деталей и необходимой производительности, затрат и т. п. Увеличение производственных возможностей характеризует каждый подход, который будет необходим для надлежащего, оптимизированного и в конечном счете успешного использования новых методов формования.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Душин М.И., Хрульков А.В., Караваев Р.Ю. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-11-11.
3. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 42–47.
4. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №6. Ст. 08.

- URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
5. Гусев Ю.А., Григорьев М.М., Тимошина Л.Н. Изготовление эталонных образцов из ПКМ с заданной пористостью методом вакуумной инфузии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-6-6.
 6. 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.
 7. Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Компьютерное моделирование технологического процесса изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 286–291.
 8. Кириллов В.Н., Вапиров Ю.М., Дрозд Е.А. Исследование атмосферной стойкости полимерных композиционных материалов в условиях атмосферы теплого влажного и умеренно теплого климата // Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 31–38.
 9. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
 10. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
 11. 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.
 12. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
 13. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
 14. Grunenfelder L.K., Centea T., Hubert P., Nutt S.R. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg // Composites Part A: Applied Science Manufacturing. 2013. Vol. 45. P. 119–126.
 15. Centea T., Grunenfelder L.K., Nutt S.R. A review of out-of-autoclave prepreps – material properties, process phenomena and manufacturing considerations // Composites Part A: Applied Science Manufacturing. 2014. P. 132–154.
 16. Thorfinnson B., Biermann T. Degree of Impregnation of Prepreps – Effects on Porosity // Proceedings 32nd International SAMPE Symposium, Anaheim, CA: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering. 1987. P. 9.
 17. Thorfinnson B., Biermann T. Production of Void Free Composite Parts Without Debulking // Proceedings 31st International SAMPE Symposium, Las Vegas, NV: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering. 1986. P. 10.
 18. Kratz J., Hubert P. Anisotropic air permeability in out-of-autoclave prepreps: Effect on honeycomb panel evacuation prior to cure // Composites Part A: Applied Science Manufacturing. 2013. Vol. 49. P. 179–191.
 19. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void formation in composite prepreps – Effect of dissolved moisture // Composites Science and Technology. 2010. Vol. 70. P. 2304–2309.
 20. Tavares S.S., Michaud V., Manson J.A.E. Through thickness air permeability of prepreps during cure // Composites Part A: Applied Science Manufacturing. 2009. Vol. 40. P. 1587–1596.