

*А.В. ХРУЛЬКОВ, М.И. ДУШИН,
Ю.О. ПОПОВ, Д.И. КОГАН*

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АВТОКЛАВНЫХ И БЕЗАВТОКЛАВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМОВАНИЯ ПКМ

В 2006 г. перед лабораторией была поставлена задача разработки стекло- и углепластиков для формообразующей оболочки оснастки взамен металлической, применяемой при вакуум-автоклавном формовании деталей из ПКМ с температурой отверждения до 180°C, применительно к самолету RRJ.

Применение неметаллической оснастки взамен металлической позволит:

- сократить время при производстве оснастки на 25–30%;
- обеспечить равномерное температурное поле при формовании на такой оснастке;
- обеспечить сокращение цикла формования за счет сокращения времени, затрачиваемого на прогрев монолитной металлической оснастки на 30–50%;
- уменьшить количество поводок и короблений деталей благодаря применению оснастки из материала с температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), близким к ТКЛР материала детали.

Для решения поставленной задачи необходимо было разработать состав связующего, позволяющий получить препреги, обеспечивающие возможность их выкладки на формы двойной кривизны. В качестве основы было выбрано ранее разработанное связующее ВСО-200, которое после модифицирования обеспечило повышенную технологичность препрегов и получило марку ВСО-200М (ТУ1-595-12-858–2005). Отработаны также режимы нанесения этого связующего на установку УПСТ-1000М на стеклоткань ЭЗ-250-76 (ТУ6-48-5786902-68–90) и на углеродную ткань УТ-900-3-240-ЭД (ТУ1916-155-05763346–95), что обеспечило их технологичность при выкладке формообразующей оболочки оснастки при температурах 18–25°C.

В процессе выполнения поставленной задачи:

- разработана технология вакуум-автоклавного формования стекло- и углепластиков;
- исследованы свойства препрегов углепластика и стеклопластика в зависимости от условий и продолжительности хранения препрегов. Установлены гарантийные сроки хранения препрега в условиях холодильной камеры (–12 ÷ –15°C) в течение 6 мес, при комнатной температуре (18 ÷ 25°C): 1 мес;
- выпущены технические условия ТУ1-595-25-882–2006 взамен ТУ1-595-25-882–2005 «Препреги стеклопластика ВПС-35(М) и ВПС-35Э(М) на основе модифицированного связующего ВСО-200М» и технологическая рекомендация ТР1.2.1895–2006 «Изготовление стеклопластика для формообразующей оболочки оснастки для изделия RRJ», а также ТУ1-595-25-1006–2007 «Препрег углепластика марки ВКУ-19 на основе связующего ВСО-200(М)» и технологическая рекомендация ТР1.2.1956–2007 «Изготовление углепластика для формообразующей оболочки оснастки для изделия RRJ»;
- показана принципиальная возможность изготовления материала формообразующей оболочки оснастки на наполнителе из углеродной ткани УТ-900-3-240-ЭД (ТУ1916-155-05763346–95);

– изготовлен модельный образец формообразующей оболочки оснастки из стеклопластика размером 800×1100 мм на мастер-модели оконной панели пассажирского самолета (рис. 1).

В рамках тематики в 2006–2007 гг. для изготовления длинномерных конструкций методом намотки (например, лонжерона лопасти вертолета) разработано расплавное связующее ВСП-3М, препреги стеклопластика ВПС-31 и углестеклопластика ВКГ-5 на его основе. Жизнеспособность препрега позволяет использовать его в течение 90 сут с момента изготовления с последующим автоклавным формованием. Пластики на основе расплавного связующего обладают высоким уровнем прочностных свойств в диапазоне температур от -60 до $+120^\circ\text{C}$, низким водопоглощением, изготавливаются по экологически чистой расплавной технологии (рис. 2).

С 2008 г. работы лаборатории были направлены на разработку технологии изготовления углепластиков методом пропитки под давлением (RTM) на основе разработанного расплавного полициануратного связующего ВСТ-1210 (ТУ1-595-12-1042–2008) и тканей УТ-900 и УОЛ-300, обеспечивающих работоспособность материала до 180°C .

Разработанное в ВИАМ докт. техн. наук Я.Д. Аврасиным в начале 60-х гг. прошлого столетия связующее ЭДТ-10 на протяжении ряда лет было единственным эпоксидным связующим расплавного типа при изготовлении стеклопластиковых изделий методом пропитки под давлением, которое широко используется и в настоящее время. Однако это связующее предназначено для изготовления изделий, работающих до 80°C .

Расширение сферы применения углепластиков в элементах конструкций самолетов и ракет потребовало создания материалов, работоспособных до 180°C . Поэтому была поставлена задача разработки расплавного связующего для переработки методом пропитки под давлением углепластиковых деталей с рабочей температурой до 180°C . Метод пропитки под давлением, в отличие от других методов изготовления, обеспечивает получение изделий заданной толщины (без дополнительной механической обработки) с гладкими наружными и внутренними поверхностями, герметичностью и минимальной пористостью, а также стабильностью свойств в разных точках изделия. Кроме того, и это очень важно, метод позволяет использовать в качестве армирующего наполнителя ткани трехмерного армирования с целью повышения сдвиговых характеристик материала изделия, что было использовано сотрудниками ВИАМ в 60–80-х гг. прошлого века

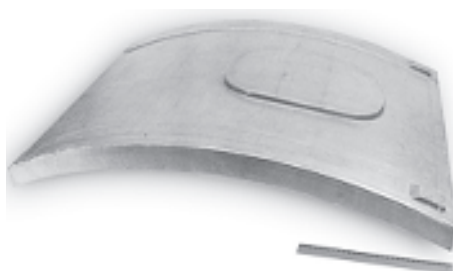


Рис. 1. Модельный образец формообразующей оболочки оснастки из стеклопластика

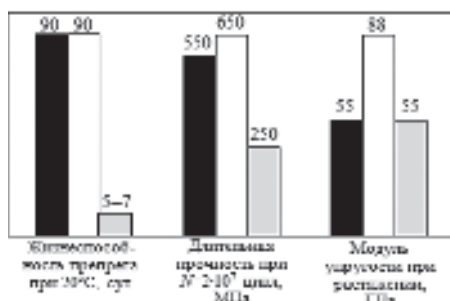


Рис. 2. Свойства материалов ВПС-31 (■) и ВКГ-5 (□) в сравнении со свойствами пластика ВПС-18 (■) на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10ВОВ

для изготовления головных частей баллистических ракет (ГЧБР) из стеклопластиков на основе многослойных тканей.

Процесс пропитки под давлением основан на законе Дарси, впервые установившем в середине XIX в. связь скорости фильтрации при ламинарном течении (при постоянной толщине фильтра) с напором.

В результате проведенных работ:

– произведен расчет соотношения основных компонентов углепластиков (наполнитель/связующее) в зависимости от используемых наполнителей:

– 60% наполнителя – для углеродной равнопрочной двунаправленной ткани УТ-900 (ТУ1916-155-05763346-95);

– 70% наполнителя – для однонаправленной ленты УОЛ-300 (ТУ1916-167-05763346-96);

– проведены исследования деформируемости армирующих углеродных наполнителей и учтена возможность деформации набранного пакета сухого наполнителя до 60–70% от исходной толщины (в пресс-форме должен быть предусмотрен компенсационный зазор для уплотнения пакета наполнителя);

– проведены экспериментальные исследования коэффициента проницаемости углеродных наполнителей (УТ-900 и УОЛ-300) в зависимости от величины уплотнения (толщины монослоя);

– исследована совместимость углеродных наполнителей с полициануратным расплавным связующим;

– отработаны режимы пропитки под давлением углепластиков с заданным соотношением наполнитель/связующее;

– отработан режим отверждения образцов панелей углепластиков;

– изготовлены плоские панели углепластиков и исследованы их физико-механические свойства при комнатной и повышенной температурах.

Установлено, что полученные углепластики по прочности при растяжении, изгибе и межслойном сдвиге находятся на уровне серийно применяемых углепластиков КМУ-7Т и КМУ-7Т2А. Водопоглощение углепластиков за 30 сут пребывания в дистиллированной воде при комнатной температуре составляет 0,28–0,32 (табл. 1) вместо 0,9–1,13% у углепластиков, приведенных для сравнения.

Таблица 1

Водопоглощение углепластиков

Марка наполнителя углепластика	Привес, %, после экспозиции в дистиллированной воде						
	в холодной в течение, сут						в кипящей 2 ч
	1	2	5	10	20	30	
УТ-900	0,04	0,06	0,08	0,13	0,23	0,28	0,22
УОЛ-300	0,05	–	0,12	0,19	0,27	0,32	0,53

Как видно из данных табл. 1, водопоглощение минимально и за 30 сут составляет ~0,3% с тенденцией к некоторому увеличению на наполнителе УОЛ-300 (на ~18%). Испытания в дистиллированной кипящей воде в течение 2 ч показали превосходство углепластика на наполнителе УТ-900.

Количество поглощенной воды при кипячении в течение 2 ч практически соответствует 30-тисуточной выдержке в холодной воде. Поэтому в последующем образцы подвергали кипячению и исследовали прочность при изгибе и межслойном сдвиге методом испытания на изгиб короткой балки.

Разработаны:

- технические условия ТУ1-595-12-1042–2008 «Связующее ВСТ-1210»;
- директивный технологический процесс ДТП 1.595-12-115–2008 «Изготовление связующего марки ВСТ-1210 в условиях опытного производства»;

- директивный технологический процесс ДТП 1.595-25-110–2008 «Изготовление углепластиков методом пропитки под давлением расплавом связующего», определяющий порядок работы при изготовлении экспериментальных образцов панелей углепластиков в процессе отработки технологии их изготовления;

- технологическая рекомендация ТР1.2.2012–2008 «Изготовление углепластика методом пропитки под давлением (RTM)», которая может быть использована при разработке технологической и конструкторской документации на изготовление экспериментальных изделий (деталей) из углепластика.

В 2008–2009 гг. продолжились работы по отработке режимов пропитки под давлением стеклянных и углеродных наполнителей без прошивки и прошитых. В качестве связующего использовалось ранее разработанное (2008 г.) связующее ВСТ-1210.

За рубежом уделяется большое внимание повышению сдвиговой и трансверсальной прочности полимерных композиционных материалов. Так, в США начиная с 1980 г. по заказу НАСА развивается другая технология получения объемных заготовок – технология многослойных прошивных преформ. Этот метод предусматривает послойную выкладку однослойных тканей с одновременной их прошивкой по толщине (Z-прошивка). Для получения прошивных заготовок были сконструированы и выпускаются специальные пропиточно-укладочные машины, которые позволили получить заготовки длиной до 15 м, шириной до 3 м и толщиной до 4 мм. Технология получения конструкций с использованием таких заготовок была применена фирмой «Lockheed Martin» для деталей истребителя-бомбардировщика JSF.

Изготовление изделий из прошитых заготовок оказалось на 28% дешевле, чем изготовление их из препрегов как при ручной, так и автоматизированной выкладках. Была проведена отработка технологии изготовления углепластиков и стеклопластиков на основе прошитых заготовок методом пропитки под давлением. С целью определения оптимального соотношения армирующего наполнителя, связующего и пористости в готовом композите с различными схемами армирования были проведены расчеты соотношения основных компонентов композиционных материалов, разработан и выпущен методический материал ММ 1.2.086–2009 «Расчет компонентов композиционных материалов (КМ)».

Проведена работа по исследованию параметров пропитки пакетов наполнителей и выпущен методический материал ММ 1.2.115–2009 «Метод определения коэффициента проницаемости трансверсально прошитых структур тканых армирующих наполнителей на основе углеродных, стеклянных и органических волокон».

На основании проведенных исследований была разработана и выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2086–2009 «Изготовление деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением (RTM)». По этой технологии были изготовлены плиты угле- и стеклопластиков размером 400×400 мм на основе прошитых и не прошитых заготовок для определения их физико-механических свойств. Эффективность использования методов прошивки определялась по стойкости к удару на образцах размером 140×60 мм, а также определена их остаточная прочность при сжатии. Площадь расслоения прошитых образцов после удара меньше, чем у не прошитых почти в 3 раза.

С 2010 г. началась разработка энергосберегающих безавтоклавных технологий изготовления углепластиков с использованием метода пропитки сухого армирующего наполнителя связующим под действием вакуума (называемая за рубежом VARTM или инфузия) и метода вакуумного формования пакета препрега.

Метод инфузии (VARTM) – это модификация метода пропитки под давлением с той лишь разницей, что для подачи связующего в форму используется не избыточное, а атмосферное давление. Через специальный штуцер из формы откачивается воздух, после чего в нее подается связующее. Для снижения стоимости в этом методе можно заменить верхнюю часть формы вакуумным мешком. Однако это и недостаток метода, так как уплотнение материала в этом случае осуществляется только за счет атмосферного давления. Метод используется для изготовления изделий, к которым не предъявляются высокие требования по прочностным и весовым характеристикам.

Последнее инновационное решение за рубежом – метод SCRJMP (Seeman Composites Resin Infusion Process), основанный на том, что связующее не течет через пакет наполнителя в горизонтальном направлении, не продавливается, как при пропитке под давлением (RTM), а равномерно распространяется по всей поверхности пакета наполнителя. Пропитка производится в поперечном направлении, что практически не ограничивает габарит изделий. Этим методом была изготовлена створка грузового отсека размером $6,5 \times 4,5$ м транспортного самолета А-400М [1].

В настоящее время конструкции из полимерных материалов (ПКМ) для самолетов, такие как зализы, элементы механизации крыла и хвостового оперения, изготавливаются методом автоклавного формования. В перспективных самолетах МС-21, SSJ применение методов инфузии (вакуумная пропитка сухого наполнителя связующим – VARTM) и формования пакета препрега под вакуумом позволят сократить стоимость конструкций из ПКМ. Инфузия исключает операцию получения препрега и позволяет получить изделие требуемой геометрии посредством пропитки сухого предварительно собранного пакета наполнителя, в том числе с трехмерным армированием, что невозможно обеспечить послойной укладкой препрега.

Для углепластиков, получаемых методами инфузии и вакуумного формования пакета препрега, была поставлена задача – разработать составы и технологии изготовления расплавных связующих с температурой отверждения не выше 180°C :

- для инфузии – с жизнеспособностью не менее 2 ч и вязкостью не более $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- для препрегового варианта – с жизнеспособностью не менее 20 сут при комнатной температуре.

Для метода инфузии было разработано связующее ВСЭ-21 (ТУ1-595-12-1195–2011). Разработаны также технологии получения углепластиков с прочностью не менее 1600 МПа, рабочей температурой до 100°C методами инфузии и вакуумного формования пакета препрега для изготовления слабо- и средненагруженных конструкций из ПКМ (створки шасси, закрылки, элементы хвостового оперения и др.).

В результате проведенных работ были выбраны углеродные наполнители, удовлетворяющие требования ТЗ по прочности (1600 МПа). Выпускаемые в РФ в настоящее время углеродные ленты типа УОЛ-300 гарантируют предел прочности при растяжении 1370 МПа (ТУ1916-167-05763346–96). В результате анализа прочности при растяжении углепластиков, полученных в ВИАМ на основе растворных связующих и импортных углеродных тканей, была выбрана углеродная ткань фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3673) для процесса инфузии, а для процесса вакуумного формования углепластиков из пакета препрега – углеродные жгуты HTS.

Согласно данным «Справочника по композиционным материалам» том 2 [2], оптимальные свойства углепластиков на основе однонаправленных тканей наиболее воспроизводимо обеспечиваются, когда объемное содержание волокна составляет 0,60–0,65%. К таким тканям относится углеткань фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3673), на основе которой методом инфузии были изготовлены образцы углепластиков с указанным наполнением. Исследовано влияние величины вакуума на степень уплотнения пакета наполнителя с этой тканью, определяющее соотношение наполнитель/связующее в пластике, а также проницаемость пакета. В процессе изготовления опытных образцов углепластиков оценивалась скорость их пропитки.

Влияние приложенного давления уплотнения на изменение толщины монослоя исследовалось с помощью испытательной машины «Тиратест», в которую складывались 40 слоев ткани арт. 3673. Результаты испытаний представлены на рис. 3. Видно, что уже при удельном давлении 0,05–0,06 МПа достигается наполнение волокном 0,59–0,61%, а при давлении ~0,1 МПа: 0,63–0,64%.

На скорость пропитки (согласно закона Дарси) влияет проницаемость наполнителя, связанная с его пористостью, а также вязкость связующего, давление пропитки и протяженность (длина пути) в направлении пропитки [3].

Выбранная схема пропитки под вакуумом (инфузия) предусматривает движение связующего в поперечном к укладке слоев направлении. Эта схема пропитки практически не связана с габаритами изготавливаемых изделий, что является одним из преимуществ этого метода. Затем при исследовании технологических параметров изготовления образцов углепластика определяли проницаемость ткани фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3673) в поперечном направлении в зависимости от изменения монослоя (пористости ткани). Проницаемость (или пропускная способность) пористой среды армирующих наполнителей обусловлена особенностью

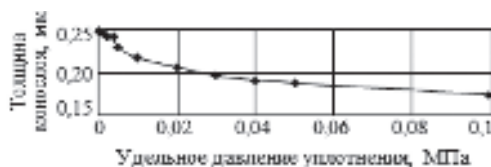


Рис. 3. Изменение толщины монослоя ткани фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3673) в зависимости от приложенного давления

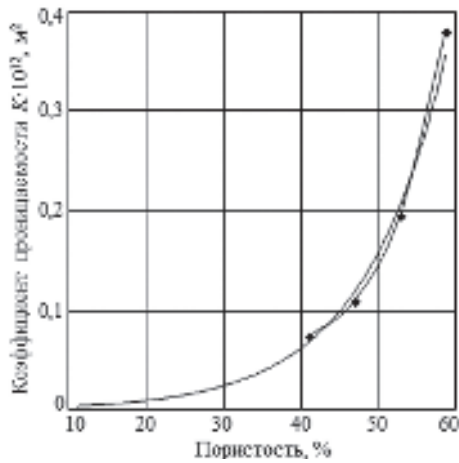


Рис. 4. Зависимость коэффициента проницаемости углеродной ткани фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3673) от пористости (♦); – экспоненциальная кривая

строения их порового пространства, состоящего в основном из двух видов пористости: поры в нитях (микрорпоры), образованные между отдельными моноволокнами, из которых состоит нить, а также поры между нитями (макрорпоры). Исследования проводили на специально разработанном приспособлении.

Результаты измерения представлены на рис. 4. Видно, что с уменьшением пористости пакета резко падает проницаемость, и при уплотнении пакета до 38–40% порового пространства коэффициент проницаемости составляет в дарси всего $0,05–0,055 \text{ Д}$ или $(5–5,5) \cdot 10^{-9} \text{ см}^2$.

Вязкость связующего влияет на скорость пропитки, поэтому исследовали изменение вязкости связующего ВСЭ-21 от температуры, а также жизнеспособность его

при разных температурах для выбора режима пропитки. На рис. 5 представлена зависимость вязкости связующего от температуры, а на рис. 6 – жизнеспособность его при разных температурах. Видно, что при температуре 60°C жизнеспособность выше 2 ч, а при 80°C после 1 ч вязкость резко возрастает, поэтому была выбрана средняя температура пропитки, равная 70°C , при которой вязкость составляет $0,17 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (170 сП).

Пропиткой под вакуумом были изготовлены опытные образцы углепластиков для исследования физико-механических и эксплуатационных свойств. Результаты представлены в табл. 2.

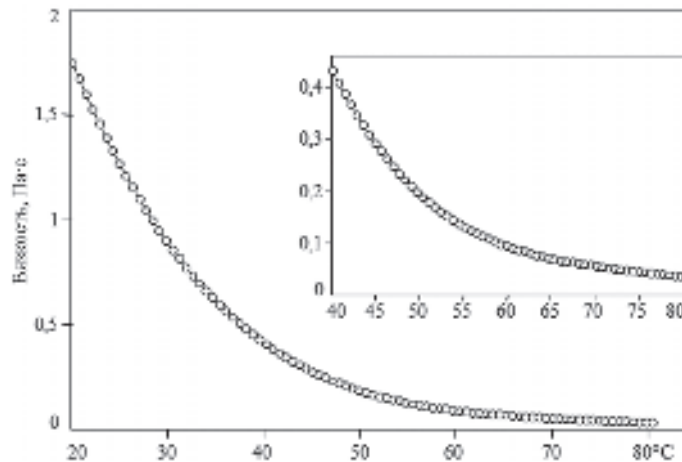


Рис. 5. Температурная зависимость вязкости связующего ВСЭ-21

Из данных табл. 2 видно, что метод инфузии позволяет получить углепластики с объемным наполнением волокна >60% и пористостью <2%, что обычно достигается при автоклавном формовании препрегов. Свойства углепластика на основе ткани арт. 3673 при растяжении, сжатии, сдвиге и изгибе аналогичны свойствам углепластика, изготовленного автоклавным способом из препрегов на основе ткани арт. 3673 и связующего ЭНФБ-2М: 1700, 1000, 65 и 2000 МПа соответственно. Пористость углепластиков, изготавливаемых автоклавным формованием, находится на уровне 2–3%.

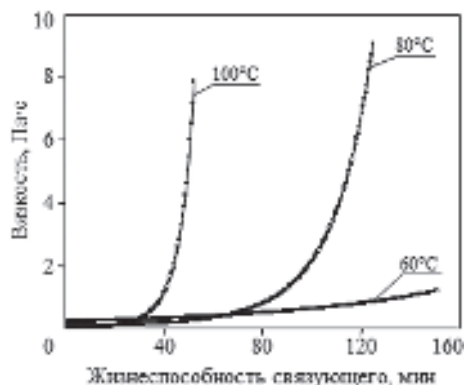


Рис. 6. Жизнеспособность связующего ВСЭ-21 при разных температурах

Таблица 2

Свойства* углепластиков на основе тканей фирмы «Porcher Ind.» арт. 4510 и 3673, изготовленных методом инфузии связующего VARTM-4-2

Свойства	Значения свойств углепластиков на основе ткани артикула		Примечание
	4510	3673	
Предел прочности при растяжении, МПа	$\frac{1430-1600}{1530}$	$\frac{1580-1870}{1713}$	ГОСТ 25.601–80
Модуль упругости при растяжении, ГПа	$\frac{115-119}{117,2}$	$\frac{145-167}{156,2}$	ГОСТ 25.601–80
Предел прочности при изгибе, МПа	$\frac{1360-1840}{1670}$	$\frac{1908-2320}{2030}$	ГОСТ 25.604–82
Модуль упругости при изгибе, ГПа	113	120	–
Предел прочности при сжатии, МПа	$\frac{935-1015}{952}$	$\frac{1120-1250}{1180}$	ГОСТ 25.602–80
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	53,3	58,4	РД50-675–88
Объемное содержание волокна, %	53,7	63,4	Расчетные значения
Плотность углепластика, г/см ³ (гидростатическое взвешивание)	$\frac{1,57-1,60}{1,58}$	$\frac{1,56-1,58}{1,57}$	ГОСТ 15139–69
Толщина монослоя, мм	0,21	0,176	Расчетные значения
Теоретическая плотность, г/см ³	1,595	1,594	То же
Пористость углепластика, %	1,3	1,57	– " –

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Таким образом, метод инфузии позволяет получать материалы со свойствами, аналогичными свойствам углепластиков, изготавливаемых в автоклаве из препрегов. Однако следует отметить, что для инфузии лучше использовать двунаправленные ткани, обладающие большим коэффициентом проницаемости, например, отечественную ткань УТ-900 или импортную ткань фирмы «Porcher Ind.» (арт. 3692).

Одной из наиболее активно развивающихся в мире технологий изготовления изделий из полимерных композиционных материалов является технология вакуумного формования пакета препрега. Преимуществом данной технологии является то, что для изготовления деталей нет необходимости использовать дорогостоящее оборудование (автоклав). Формование проводится в печи под действием вакуума. При этом используются все преимущества традиционной препреговой технологии: возможность автоматизированной выкладки заготовки, возможность изготовления детали с заданными физико-механическими характеристиками благодаря применению препрегов с требуемым соотношением наполнитель/связующее.

Начиная с 2010 г. специалистами ВИАМ ведется работа над усовершенствованием технологии вакуумного формования пакета препрега. Исследованы реологические характеристики различных связующих, проницаемость стеклянных и углеродных наполнителей различной структуры. С учетом результатов проведенных работ были сформулированы технические требования к связующему, обеспечивающему качественную пропитку наполнителя и уплотнение пакета при формовании с использованием вакуума. Разработано связующее марки ВСЭ-22 (ТУ1-595-12-1197–2011), обеспечивающее изготовление по вышеуказанной технологии ПКМ с максимальной рабочей температурой не менее 100°C.

Разработана технология изготовления препрега на основе связующего ВСЭ-22 и углеродных жгутов HTS40, а также технология вакуумного формования углепластика, позволяющая изготавливать ПКМ с пористостью <3%. По разработанной технологии на основе связующего ВСЭ-22 и углеродных жгутов HTS40 изготовлены образцы пластика для исследования его физико-механических и эксплуатационных свойств.

Еще одной технологией, применяемой для изготовления средне- и слабонагруженных конструкций изделий авиационной техники, является технология пропитки пленочными связующими (Resin Film Infusion – RFI).

В указанной технологии (так же, как и в технологиях пропитки под давлением и инфузии) процесс пропитки наполнителя связующим совмещен с процессом формования детали. Однако в случае применения технологии RFI пропитка наполнителя осуществляется не в продольном, а в поперечном направлении, что значительно сокращает продолжительность пропитки. Суть способа RFI заключается в следующем:

- на оснастку выкладываются слои армирующего наполнителя и связующего в виде пленки, при этом выкладку можно производить 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.

Технология RFI обладает рядом несомненных преимуществ. Так, ряд пленочных связующих, применяемых в настоящее время, обладает рео-

логическими характеристиками, позволяющими изготавливать изделия из ПКМ вакуумным способом. Таким образом, отпадает необходимость в приобретении автоклава (стоимость которого может доходить до нескольких миллионов долларов) и дорогостоящей оснастки. Другим преимуществом технологии RFI является возможность использования заранее сформированных пакетов наполнителя – так называемых преформ. Преформа может представлять собой несколько слоев армирующего наполнителя, уложенного под требуемыми углами, или многослойную мультиаксиальную ткань, изготовленную предприятием-производителем армирующих наполнителей. 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), обеспечивающей необходимую толщину и геометрию детали. Для технологии RFI вполне подходят оснастки открытого типа, аналогичные применяемым для изготовления изделий из ПКМ способом вакуумной инфузии.

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

В период с 2009 по 2011 г. специалистами ФГУП «ВИАМ» разработаны эпоксидные пленочные связующие ВСЭ-19 и ВСЭ-20, обладающие комплексом реологических и физико-химических характеристик, обеспечивающим возможность изготовления по технологии RFI высокопрочных ПКМ с рабочими температурами соответственно 170 и 120°C.

В 2012 г. будут опробованы на серийном оборудовании безавтоклавные технологии изготовления изделий из углепластиков методом пропитки под вакуумом (инфузия) и формования пакета препрега под вакуумом.

ЛИТЕРАТУРА

1. JEC Composites chow wzap-up, Posted: Fridag. 2010. V. 4. № 16.
2. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение. 1988.
3. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4. С. 24–33.