

УДК 678.8

Р.А. Сатдинов¹, Е.А. Вешкин¹, В.И. Постнов¹, С.П. Савин¹, В.В. Куликов²

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ В СОЗДАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-68-77

Рассмотрены основные технологии изготовления сложных деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Проведена отработка технологических приемов – от исследования свойств наполнителя препрега до изготовления детали; от моделирования мастер-модели до изготовления оснастки, в точности повторяющей теоретический контур детали; от выбора технологии до ее реализации при изготовлении элементов трубопроводов из ПКМ для системы кондиционирования воздуха (СКВ) в летательных аппаратах. Отработан термокомпрессионный метод получения пространственно-сложных элементов СКВ.

Проведено исследование полученных деталей СКВ на герметичность и соответствие требованиям АП-25 по горючести. Выбранные технологические приемы позволили получить детали с заданными характеристиками, отвечающие предъявляемым к ним требованиям.

Ключевые слова: элементы трубопроводов, полимерный композиционный материал, система кондиционирования воздуха, стеклопластик, формование, герметичность.

R.A. Satdinov¹, E.A. Veshkin¹, V.I. Postnov¹, S.P. Savin¹, V.V. Kulikov²

DESIGN AND TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS OF CREATION OF SPACE-COMPLEX CONSTRUCTIONS FROM PCM

The basic technologies for manufacturing complex parts from polymer composite materials (PCM) are considered. Technological techniques have been tested – from researching the properties of the prepreg filler to manufacturing the part, from modeling the master model to manufacturing the rigging exactly repeating the theoretical contour of the part, from choosing the technology to its implementation in the manufacture of pipeline elements from PCM for air conditioning in aircraft. The thermocompression method for obtaining spatially complex ACS elements has been developed.

A study of the obtained parts of hard currency for tightness and compliance with the requirements of AP-25 for combustibility was carried out. The selected technological methods allowed the production of parts with specified characteristics that meet the requirements for them.

Keywords: pipeline elements, polymer composite material, air conditioning system, fiberglass, molding, tightness.

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

²Публичное акционерное общество «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» [Public Joint Stock Company «Ilyushin Aviation Complex»]; e-mail: info@ilyushin.net

Введение

Авиация и авиастроение – одни из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию – в частности, высокоэффективные материалы и технологии. Многолетняя отечественная и зарубежная практика показывает, что более 80% инновационных разработок в ведущих отраслях промышленности и секторах экономики базируется на внедрении новых материалов и технологий их производства.

В настоящее время при производстве деталей и конструкций авиационного назначения все чаще применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1, 2]. Это связано с постоянной задачей по снижению массы летательного аппарата и продлению срока его службы, как следствие – экономией топлива и снижением стоимости перевозок. Так, в летательных аппаратах применяются ПКМ на основе стекло-, угле-, органо- и борволокна, их объем использования в конструкциях современных самолетов достигает 50% от массы изделия. Из них изготавливают как слабо- и средненагруженные, так и высоконагруженные конструкции («черное» крыло, хвостовое оперение, лопасть вертолета и т. д.). Для изготовления высоконагруженных конструкций разработчики в основном выбирают ПКМ на основе углеволокна, реже – борволокна. Связанно это с тем, что углепластик имеет повышенные упруго-прочностные характеристики. Однако для средне- и слабонагруженных конструкций применение дорогостоящего сырья (углеволокна) не всегда оправдано.

Для изготовления пространственно-сложных деталей из ПКМ (кессон крыла, элементы системы кондиционирования воздухом (СКВ), стрингерные панели и т. д.) основной задачей является правильность выбора технологии их изготовления. Выбранная технология должна быть энергосберегающей и нетрудоемкой. Существует множество технологий для изготовления сложных деталей и конструкций из ПКМ:

- контактное формование;
- инфузия – пропитка полимерным связующим сухого волокна под действием вакуума или давления;
- формование из препрегов и премиксов;
- пултрузия – технологический метод, заключающийся в пропитке полимерным связующим армирующих непрерывных волокон и протягивание их через формообразующее устройство, с отверждением данной композиции в виде длинномерной конструкции;
- механическая обработка деталей;
- 3D-печать.

Однако в настоящее время для изготовления сложных деталей из ПКМ в основном применяются такие технологии, как препреговая, инфузия и 3D-печать.

Под инфузионной технологией подразумевается выкладка сухих слоев наполнителя на поверхность оснастки и пропитка их полимерным связующим под действием вакуума (VARTM-технология) или выкладка слоев наполнителя в замкнутую и герметичную оснастку (матрица/пуансон) и пропитка связующим под давлением (RTM-технология) [3]. Основными недостатками данных технологий являются применение большого количества вспомогательных материалов, дорогостоящего оборудования и достаточно сложный процесс, требующий от работников высокой квалификации.

Технология изготовления деталей авиационного назначения при помощи 3D-печати стала серьезно рассматриваться относительно недавно. Применяют два основных метода получения изделий – экструзию и грануляцию. Экструзия подразумевает создание трехмерных объектов путем последовательного нанесения слоев расплавленного материала, повторяющих контуры цифровой модели (fused deposition modeling – FDM-технология); слои соединяются друг с другом и при охлаждении застывают. Грануляция (технологии direct metal laser sintering – DMLS, selective laser sintering – SLS, selective laser melting – SLM) подразумевает использование лазера для спекания частиц порошкообразного материала до образования трехмерного физического объекта. Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели. По завершении сканирования рабочая платформа опускается и наносится новый слой материала. Процесс повторяется до образования полной модели. Основными преимуществами 3D-печати являются: изготовление деталей любой сложности, точность позиционирования, гладкость поверхности и высокая производительность. Основными недостатками – низкая прочность,

ограниченность в материалах, дорогостоящее оборудование и ограниченность в габаритных размерах получаемой детали.

Препреговая технология заключается в послойной выкладке расчетного количества слоев препрега на формообразующую оснастку, после чего происходит формообразование деталей с применением повышенных температур – в автоклаве или термопечи (вакуумное или вакуум-автоклавное формование) в зависимости от назначения изделия. Данные технологии являются наиболее востребованными. Это обусловлено технологичностью их применения в производстве [4]. Однако применение дорогостоящего оборудования в виде автоклава для изготовления слабо- и средненагруженных деталей тоже не всегда приемлемо.

В данной статье рассмотрены технологические приемы при создании пространственно-сложных элементов трубопроводов из ПКМ для системы СКВ летательного аппарата [5].

До недавнего времени отечественные элементы СКВ изготавливали в основном из металлов или импортных ПКМ. Это объясняется тем, что в нашей стране разработка ПКМ для сложнопрофилированных воздухопроводов низкого давления СКВ в последние десятилетия не проводилась, а разработанные ранее полимерные материалы не отвечают постоянно ужесточающимся требованиям АП-25 [6, 7], а также имеют длительный цикл изготовления. Ведущие мировые производители авиационной техники (Boeing и Airbus) применяют в конструкции СКВ в основном ПКМ [8–11].

В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработаны материалы и технологии для изготовления сложных элементов трубопроводов из ПКМ и взяты за основу при проектировании СКВ для самолета Ил-114-300. Для внедрения таких материалов во ФГУП «ВИАМ» проведена следующая работа:

- исследованы свойства множества наполнителей, используемых для изготовления как самих элементов СКВ, так и оснасток;
- исследованы свойства препрегов для изготовления элементов СКВ;
- проведена паспортизация стеклопластиков;
- проведен выбор материалов для изготовления как мастер-моделей, так и оснасток;
- на основе разработанных материалов выбрана и отработана технология изготовления пространственно-сложных элементов СКВ.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

В данной работе для изготовления элементов трубопроводов СКВ для летательных аппаратов использовали два вида препрегов на основе быстроотверждаемого фенолформальдегидного связующего марки ВСФ-16М:

- ВПС-42П со стеклянным наполнителем марки Т-15(П)-76 [13];
- ВПС-42П/Т-64 со стеклянным наполнителем марки Т-64(ВМП)-78.

Для изготовления полимерных композиционных оснасток с рабочей температурой до 200 °С применяли препреги стеклопластиков на основе безрастворного расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-36:

- ВПС-59/290 на стеклоткани Т-10-14;
- ВПС-59/680 на стеклоткани ТР-0,56.

Исследование драпируемости тканых наполнителей проводили согласно патенту [14].

Определение предела прочности образцов проводили:

- при растяжении по ГОСТ 11262–2017;
- при сжатии по ГОСТ Р 57756–2017;
- при межслойном сдвиге по ГОСТ 32659–2014;
- при статическом изгибе по ГОСТ 4648–2014.

Определение объемной плотности осуществляли по ГОСТ 15139–69. Определение температуры стеклования матрицы в пластике проводили методом динамического механического анализа на приборе DMA 242E (Netzsch) [15].

Результаты и обсуждение

Как отмечалось ранее, одной из основных задач при изготовлении пространственно сложных элементов является правильный выбор технологии изготовления. В связи с тем, что при формировании слоев препрега сложной детали применяется ручная выкладка, препрег должен обладать определенными технологическими свойствами: иметь хорошую драпируемость, быть в меру липким. Для этого проведено исследование свойств наполнителей и препрегов, используемых при изготовлении оснасток и деталей СКВ. В связи с изготовлением сложных элементов для СКВ, в первую очередь проведено исследование драпируемости (Д) наполнителей, которая определяется по формуле

$$Д = \frac{200}{A} \cdot 100,$$

где A – расстояние между углами нижнего края образца через 30 мин выдержки.

Суть данного исследования заключалась в определении способности выбранных наполнителей в подвешенном состоянии (30 мин) под действием собственного веса принимать пространственную форму и образовывать мягкие, подвижные складки (рис. 1). Кроме драпируемости наполнителей, проведено исследование изменения линейных размеров наполнителей по различным направлениям в интервале углов 0–90 градусов к нитям основы. Полученные результаты представлены в таблице.

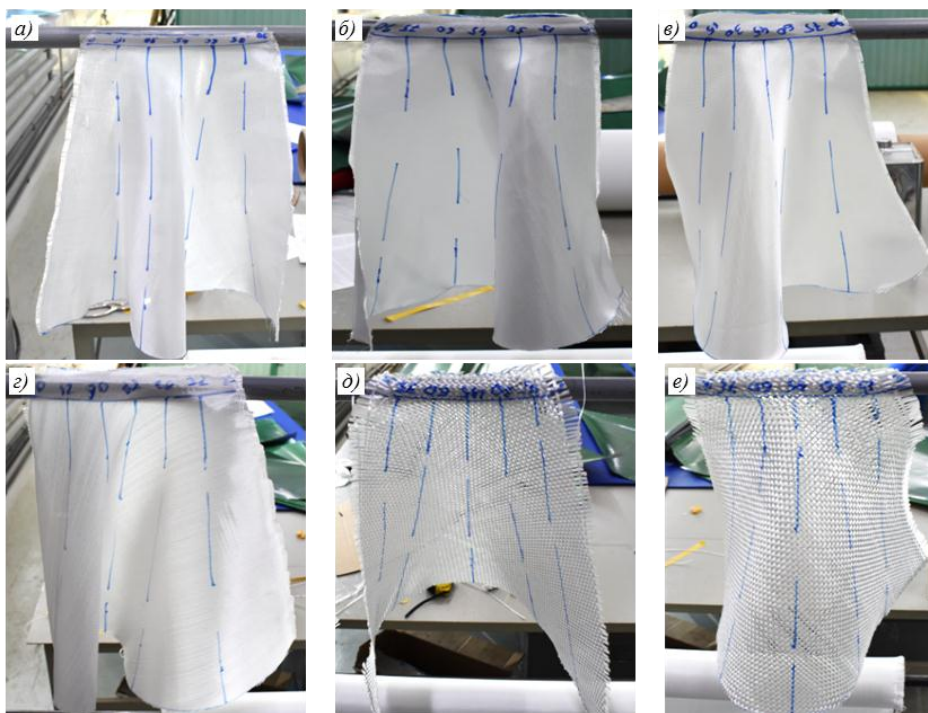


Рис. 1. Визуализация драпируемости стеклотканей марок Т-64(ВМП)-78 (а), Т-10-14 (б), Т-15(II)-76 (в), Т-60(ВМП)-14 (г), TP-0,56 (д) и Ortex-520 (е)

Драпируемость и изменение линейных размеров стеклотканей

Стеклоткань	Драпируемость, %	Изменение линейных размеров, %, под углом к нитям основы, градус						
		0	15	30	45	60	75	90
T-64	62,5	0	0	1	2	1,5	1	0
T-10	95	0	1	2	1	0	0	0
T-15	71	0	0,5	2,5	3,5	2,5	1	0,5
T-60	65	0	1	2	2	1,5	1	0
TP-520	74	0,5	2	3,5	5	3	1	0,5
Ortex-520	87	0	1	2	4	2	1	0

Исходя из полученных данных, для уменьшения риска образования складок при выкладке и формовании элементов СКВ и оснасток, имеющих сложную пространственную поверхность, необходимо производить укладку слоев под углом 45 ± 15 градусов.

В дальнейшем проводилась работа по разработке материалов для изготовления элементов СКВ. Разработаны препреги стеклопластиков марок ВПС-42П и ВПС-42П/Т-64 [16]. Проведенные исследования по определению гарантийного срока хранения препрега показали, что они остаются пригодными для применения в течение 3 мес при температуре хранения от 0 до 5 °С и 1 мес при температуре хранения от 15 до 25 °С.

В процессе разработки технологий изготовления препрегов стеклопластиков, а также определения технологичности препрегов на основе стеклотканей Т-15(П)-76 и Т-64(ВМП)-78 и фенолформальдегидного связующего ВСФ-16М исследована зависимость массовой доли летучих веществ от температуры (120–160 °С) и продолжительности (75–150 с) сушки препрега. Полученные данные приведены на рис. 2.

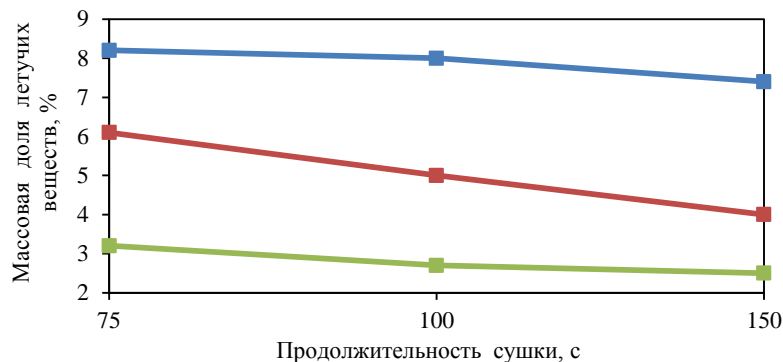


Рис. 2. Зависимость массовой доли летучих веществ от продолжительности сушки препрега и температуры: 120 (■), 140 (■) и 160 °С (■)

Установлено, что при содержании летучих веществ в диапазоне от 4 до 8% препреги имеет хорошую технологичность (липкость) для формования изделий из ПКМ.

Для выбора оптимального температурного режима отверждения стеклопластика ВПС-42П/Т-64 исследована кинетика отверждения связующего ВСФ-16М на установке DSC 204F1. В качестве критерия оценки полимерного связующего выбрана степень конверсии, которая должна быть не менее 95%. На основании результатов исследования и с помощью термокинетического анализа в программной среде Netzsch Kinetics 3/1 спрогнозированы кривые степени отверждения в зависимости от продолжительности изотермической выдержки. В результате предварительного термохимического анализа установлен оптимальный температурно-временной параметр для получения пластика со степенью конверсии не менее 95%.

Для исследования влияния скорости нагрева, удельного давления формования, схемы армирования и величины нахлеста на основные свойства стеклопластика, прессовым методом отформованы плиты стеклопластика. Из изготовленных плит стеклопластика

методом механической обработки вырезаны стандартные образцы и проведены исследования их основных физико-механических свойств. Установлено, что процент сохранения прочностных свойств (по отношению к образцу, выложенному по схеме – все слои в $[0]_n^\circ$) при выкладке: $[0; 90]_n^\circ$ составляет от 73 до 90%; $[0; 90; \pm 45]_n^\circ$ – от 60 до 95%; $[\pm 45]_n^\circ$ – от 40 до 80% (рис. 3).

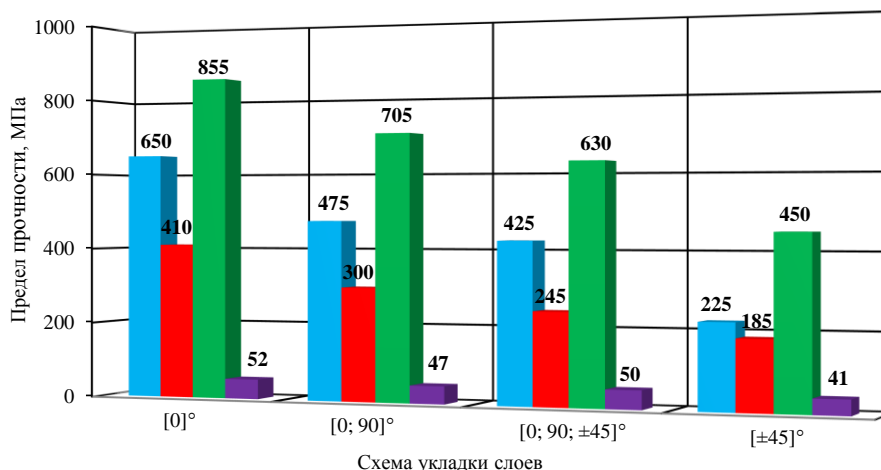


Рис. 3. Свойства стеклопластика ВПС-42П/Т-64 в зависимости от схемы укладки слоев – пределы прочности: при растяжении (■), сжатии (■), изгибе (■) и сдвиге (■)

Для того чтобы избежать образования складок при выкладке слоев препрега на оснастку, а также при дальнейшем формовании элементов трубопроводов СКВ, выбрана схема выкладки $[\pm 45]_n^\circ$. Выкладку элементов СКВ производили из заготовок препрега, заранее раскроенного на станке с ЧПУ. При выкладке слоев препрега применяли их перестыковку между собой. Известно, что при перестыковке слоев препрега в этой зоне ПКМ могут снижаться прочностные свойства. В связи с этим проведена работа по исследованию влияния размеров нахлеста препрегов друг на друга на механические свойства ПКМ. Для этого изготовили образцы с нахлестом 5, 10, 15 и 20 мм и определили их механические свойства (предел прочности при: растяжении, сжатии, статическом изгибе и межслойном сдвиге). Согласно полученным данным, а также предъявляемым требованиям к деталям СКВ установлено, что выкладка слоев препрега должна производиться с перехлестом от 10 до 15 мм, так как при этом сохранение свойств ПКМ достигает максимальных значений (до 100%) при минимальном увеличении массы детали.

На основании проведенных исследований разработаны материалы и технологии их изготовления, а также схема выкладки слоев препрега для изготовления пространственно-сложных элементов СКВ.

Основное значение в формировании точных геометрических размеров детали из ПКМ имеет правильный выбор материала для формообразующей оснастки. Основное требование, предъявляемое к оснастке, – это герметичность и стабильность ее размеров при температурах, необходимых для формования изготавливаемой на ней детали. В связи с этим следующий этап работы – выбор материалов, используемых при изготовлении формообразующей оснастки. При изготовлении пространственно-сложных деталей из ПКМ применение металлической оснастки становится невыгодным вследствие большой разницы в значениях температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) материалов, что приводит к короблению формируемых деталей, значительным затратам энергии на нагрев, высокой трудоемкости изготовления (сварки, слесарной и механической обработки). Очевидно, что оснастка из полимерного композита в основном будет соответствовать всем необходимым требованиям для изготовления деталей из ПКМ.

Во ФГУП «ВИАМ» разработано и освоено производство препрегов из стеклопластика марки ВПС-59 на основе стеклотканей Т-10-14 и ТР-056 и эпоксидного связующего ВСЭ-36 с рабочей температурой 180 °С. Уруго-прочностные свойства стеклопластика сохраняются на >80% после термоциклирования в течение 110 циклов «нагрев–охлаждение» при температурах 20±200 °С, что подтверждает возможность его применения для изготовления выклеочной оснастки [17–19].

В связи со сложностью получения деталей СКВ по традиционной схеме (послойная выкладка препрега на оснастку и формование под вакуумным мешком в автоклаве или термопечи) предложен метод изготовления коробов для СКВ с созданием избыточного давления при формовании эластичным пуансоном в виде камеры, помещаемой внутрь заготовки, позволяющим формирование сложнопрофильных деталей из стеклопластика ВПС-42П/Т-64 от внешнего контура.

Для проверки технологичности разработанных материалов, а также с целью опробования и отработки изготовления экспериментальных образцов элементов СКВ из ПКМ, модернизирована и смоделирована существующая конструкция элемента СКВ, материал для изготовления которой заменен с металла на стеклопластики марок ВПС-42П и ВПС-42П/Т-64 (рис. 3). Для этого спроектирована и изготовлена мастер-модель (на фрезерном станке MultiCam 3000), а на ее основе – разборная формообразующая полимерная оснастка, состоящая из нескольких частей [20].

Для обеспечения съема короба с оснастки на ее поверхность нанесены антиадгезионные слои. На рабочую поверхность оснастки, согласно разработанной схеме, выложены слои препрега. По завершении процесса выкладки препрега на частях оснастки они собраны в единую заготовку, внутрь которой заложен эластичный элемент. Части оснастки соединены между собой болтами, через отверстия во фланцах. Формование детали производили в термопечи с созданием избыточного давления за счет подачи воздуха в эластичную камеру, заложенную внутрь заготовки.

После окончания формования детали производили разбор частей оснастки, извлечение камеры и механическую обработку детали. Технологический процесс получения формообразующей оснастки и заготовки СКВ из ПКМ представлен на рис. 4.

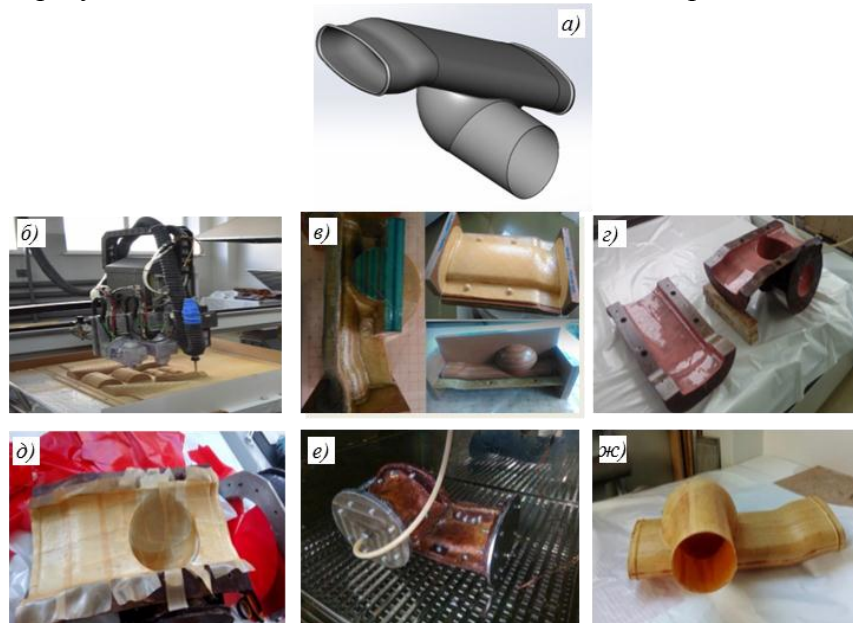


Рис. 4. Технологический процесс изготовления формообразующей оснастки и заготовки системы кондиционирования воздуха (СКВ) из ПКМ:

а – математическая модель детали; *б* – изготовление мастер-модели; *в* – выкладка оснастки; *г* – формообразующая оснастка из стеклопластика; *д* – выкладка детали; *е* – формование детали; *ж* – готовая заготовка СКВ из ПКМ

На специально изготовленном стенде (рис. 5) проведено исследование герметичности заготовок СКВ из ПКМ согласно ОСТ1 00128–74 [21]. Данное исследование показало, что из-за пористости ПКМ для достижения предъявляемых требований по герметичности необходимо применение дополнительного герметизирующего слоя. В качестве данного слоя выбран фторопластовый лак, который отличается высокими защитными, электроизоляционными и антиадгезионными свойствами, а также устойчивостью к действию агрессивных сред (кислот, щелочей, растворителей, влаги). В результате нанесения данного слоя на поверхность деталей СКВ из разработанного стеклопластика и повторного их испытания установлено, что они соответствуют требованиям ТУ по герметичности.

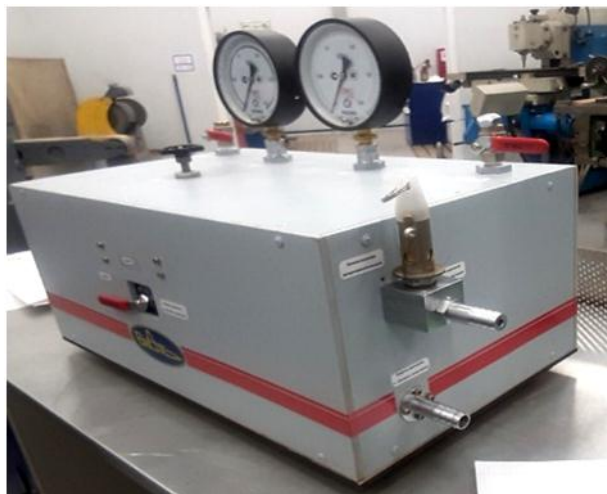


Рис. 5. Стенд для проведения исследования герметичности изделий



Рис. 6. Элементы системы кондиционирования воздуха из стеклопластика

Данная работа позволила найти решение проблем, возникающих при изготовлении пространственно-сложных деталей из ПКМ. Выбранные технологические подходы позволили получить элементы СКВ из ПКМ, отвечающие требованиям по герметичности, горючести и массе, которые внедряются в серийное производство (рис. 6) [22, 23].

Заключения

В результате проведенной работы выбраны и отработаны конструктивно-технологические приемы изготовления пространственно-сложных деталей из ПКМ, на основании которых:

– разработан новый отечественный стеклопластик марки ВПС-42П/Т-64, отвечающий требованиям по пожаробезопасности АП-25 для изготовления жестких элементов СКВ;

- созданная технология изготовления сложнопрофильных конструкций СКВ на основе отечественного стеклопластика позволила проводить формование деталей различной конфигурации за одну операцию;
- полученные заготовки патрубков СКВ полностью удовлетворяют требованиям герметичности и АП-25 (Приложение F, Часть 1);
- применение разработанного стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64 и технологий для производства СКВ летательных аппаратов снизило массу воздухопроводов не менее чем на 30%;
- изготовлены элементы СКВ из ПКМ для стендовых и летных испытаний, которые подтвердили их надежность в эксплуатации и приняты к серийному производству;
- получено экспертное заключение на санитарно-эпидемиологическую экспертизу заготовок СКВ из ПКМ о соответствии предъявляемым к ним требованиям.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
2. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2018. Вып. 3. 44 с.
3. Коваленко А.В. Исследование свойств связующего для формования изделий методом пропитки под давлением // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2015. №1. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-6-6.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавным связующим // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
5. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах // *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сб. докл. конф.* М.: ВИАМ, 2017. С. 16.
6. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. с поправками 1–6. М.: Авиаиздат, 2009. 267 с.
7. Transport Category Airplanes: Airworthiness Standards. Part 25. URL: http://www.faa.gov/regulation_policies/faa_regulation (дата обращения: 02.10.2019).
8. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Воздуховоды низкого давления из ПКМ в летательных аппаратах // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №8 (44). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-8-8.
9. Ultra-lightweight air distribution & insulation systems. URL: <http://www.senioraerospacebwt.co.uk> (дата обращения: 05.02.2020).
10. Компания Gurit: офиц. сайт. URL: <http://www.mobile.gurit.com> (дата обращения: 15.01.2020).
11. Компания Hexcel: офиц. сайт URL: <http://www.hexcel.com> (дата обращения: 15.01.2020).
12. 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.
13. Швец Н.И., Застрогина О.Б., Барботько С.Л., Алексахин В.М. Фенолформальдегидное связующее пониженной горючести // *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. С. 26–32.
14. Способ определения драпируемости текстильных материалов: пат. 2119667 Рос. Федерация; заявл. 30.04.96; опубл. 27.09.98.
15. ГОСТ Р 57739–2017. Композиты полимерные. Определение температуры стеклования методом динамического механического анализа. М.: Стандартинформ, 2017. 29 с.

16. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие для нового поколения материалов интерьера // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 265–272.
17. Рябкова Н.М., Грищенко Т.А. Технология изготовления формообразующей оснастки для крупногабаритных композитных панелей на авиапредприятии // *Вестник Инженерной школы ДВФУ*. 2014. №4 (21). С. 50–53. URL: <http://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/4-21/5/> (дата обращения: 23.01.2020).
18. Оснастка для формования изделий из полимерных композиционных материалов и способ ее изготовления: пат. 2576303 Рос. Федерация; заявл. 25.12.14; опубл. 27.02.16.
19. Способ изготовления полимерной оснастки по моделям: пат. 2456157 Рос. Федерация; заявл. 16.03.11; опубл. 20.07.12.
20. Постнов В.И., Стрельников С.В., Макрушин К.В., Вешкин Е.А. Семипрег для полимерных оснасток // *Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития: тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск, 2016*. С. 186–188.
21. ОСТ1 00128–74. Герметичность изделий. Нормы: утв. Министерством 30.05.74; введ 01.01.78. 7 с.
22. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №5. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
23. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 56–63.