

Научная статья

УДК 629.7.06

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-57-68

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОГО КОНТУРА ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Вешкин¹, А.А. Баранников¹, К.В. Макрушин¹, Г.Ф. Железина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Показаны основные принципы изготовления высоконагруженных деталей из полимерных композиционных материалов, имеющих сложный криволинейный аэродинамический контур, с применением метода многофрагментного формования. В качестве примера рассмотрен технологический процесс изготовления деталей пылезащитного устройства газотурбинного двигателя вертолета. Приведены методики расчета основных характеристик препрегов, используемых для выкладки деталей, схемы изготовления данных деталей и результаты проделанной работы.

Ключевые слова: полимерные материалы, оснастка, пылезащитное устройство, криволинейные детали, препрег, формование

Для цитирования: Вешкин Е.А., Баранников А.А., Макрушин К.В., Железина Г.Ф. Особенности изготовления криволинейных деталей сложного контура из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-57-68.

Scientific article

FEATURES OF THE MANUFACTURING OF CURVED PARTS OF A COMPLEX CONTOUR MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

E.A. Veshkin¹, A.A. Barannikov¹, K.V. Makrushin¹, G.F. Zhelezina¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The basic principles of the technological process of manufacturing highly loaded parts made of polymer composite materials with a complex curved aerodynamic contour using the method of multifragment forming are shown. As an example, the technological process of manufacturing parts of a dust-proof device of a helicopter gas turbine engine is considered. The methods of calculating the main characteristics of prepregs used for laying out parts, schemes for manufacturing these parts and the results of the work done are given.

Keywords: polymer materials, tooling, dustproof device, linear parts, prepreg, molding

For citation: Veshkin E.A., Barannikov A.A., Makrushin K.V., Zhelezina G.F. Features of the manufacturing of curved parts of a complex contour made of polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-57-68.

Введение

Совершенствование материалов и технологий их переработки способствует эволюции авиационной техники [1]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря комплексу уникальных свойств, основные из которых – оптимальные удельная прочность и жесткость, а также возможности изготовления интегральных конструкций постепенно вытесняют металлы из конструкции летательных аппаратов [2]. Широкое развитие современных методов автоматизированного проектирования позволяет создавать необходимое точноразмерное оснащение и, соответственно, высоконагруженные детали из ПКМ со сложным криволинейным аэродинамическим контуром, которые ранее получали только из металлов.

При изготовлении деталей и агрегатов из ПКМ одной из основных задач является разработка такой технологии формования ПКМ, которая обеспечивала бы получение конструкций с заданными габаритами, формой, толщиной и необходимыми физико-механическими характеристиками. Главное преимущество использования ПКМ заключается в том, что путем подбора соответствующих элементов и структуры армирования матрицы можно создавать конструкции с оптимальными свойствами при минимальной массе и температурной деформации. Технологичность производства при этом, как правило, повышается за счет того, что изделие обычно изготавливается с высокой точностью, без припусков, сокращается количество операций и число сборочных единиц, крепежных деталей. Следует стремиться к тому, чтобы допуски на размеры и отклонения от них соответствовали технологическим возможностям используемых методов формования без дополнительного их уточнения с помощью механической обработки, которая существенно снижает эксплуатационные характеристики изделий. С технологической точки зрения предпочтение следует отдавать процессам, обеспечивающим окончательное формование всех поверхностей изделия за одну операцию. Такой подход позволяет достичь максимальной точности взаимного расположения базовых поверхностей и их конфигурации [3].

Часто требуется изготовить детали из ПКМ сложной криволинейной, иногда даже замкнутой формы, которые невозможно получить традиционными способами на выклевочной оснастке, так как отсутствует свободный доступ к формообразующей поверхности оснастки для выкладки препрега и изготовления вакуумного мешка. Получение таких деталей методом контактного формования без точного соблюдения расчетных схем армирования многослойной конструкции с разными видами наполнителей и применения технологии вакуум-автоклавного формования не всегда оправдано. Связано это с тем, что при изготовлении авиационных конструкций, как правило, необходимо выполнить требования технических условий, предъявляемые к качеству внешней поверхности, соответствию аэродинамическому контуру, максимальной прочности, минимальной массе и пористости. В таких случаях оправдано применение метода так называемого многофрагментного формования, который заключается в том, что любой сложный контур можно разделить на любое число отдельных фрагментов более простой формы. Рассчитанное количество слоев препрега разделяют на пакеты, которые выкладывают и уплотняют по отдельности, затем объединяют и окончательно отверждают [4]. Такая технология позволяет минимизировать габариты и массу конструкции при обеспечении заданных тактико-технических характеристик и высокой надежности в сложных условиях эксплуатации [5]. Основное преимущество данной технологии в том, что отдельные фрагменты можно сравнительно просто выполнить и максимально уплотнить для достижения оптимальных характеристик будущей детали с помощью любого числа промежуточных подформовок под вакуумным или автоклавным давлением.

Перед окончательной термообработкой с помощью вакуум-автоклавного формования или термокомпрессии фрагменты соединяют через равнопрочное «косое» соединение [6], после чего оснастка легко разбирается и извлекается отформованная целая деталь из ПКМ.

Цель данной работы – изучение возможности изготовления деталей пылезащитного устройства (ПЗУ) газотурбинного двигателя вертолета методом многофрагментного формования.

Материалы и методы

Пылезащитное устройство газотурбинного двигателя вертолета относится к так называемому лямбда-образному типу. В таких ПЗУ воздух очищается за счет взаимодействия входящего потока с поверхностями деталей, имеющих специальную аэродинамическую форму, которая обеспечивает отделение частиц пыли с помощью силы инерции. Общий вид деталей ПЗУ показан на рис. 1.

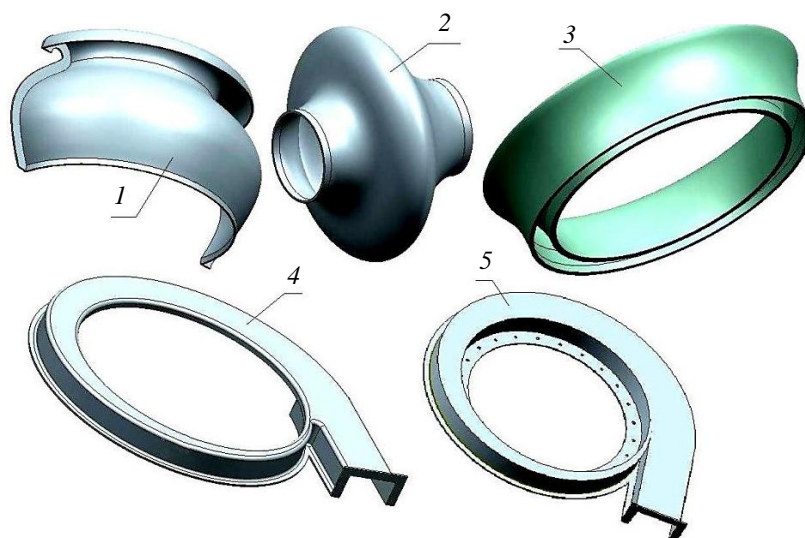


Рис. 1. Общий вид деталей пылезащитного устройства (ПЗУ): 1 – половина внешней стенки; 2 – внутренняя стенка; 3 – разделитель; 4 – верхняя часть «улитки»; 5 – нижняя часть «улитки»

Кратко принцип работы лямбда-образного ПЗУ можно описать следующим образом. Поток неочищенного воздуха, движущийся с большой скоростью, при входе резко меняет направление в криволинейном канале между внешней и внутренней стенками и разделяется посредством разделителя на два потока:

- верхний (с частицами пыли, которые сохраняют направление, так как они тяжелее воздуха) – попадает в специальное устройство – «улитку», и удаляется в атмосферу;
- нижний (с очищенным воздухом) – направляется в компрессор двигателя вертолета.

«Улитка» представляет собой короб в виде кольца с переменным сечением. В узкую часть «улитки» входит воздух с частицами пыли, который расширяется и выбрасывается в атмосферу через широкую часть «улитки». Короб «улитки» состоит из двух практически одинаковых, зеркально симметричных частей, скрепленных между собой фланцевым соединением.

Общий вид ПЗУ в собранном виде (без «улитки») показан на рис. 2, а, внутренняя компоновка – на рис. 2, б.

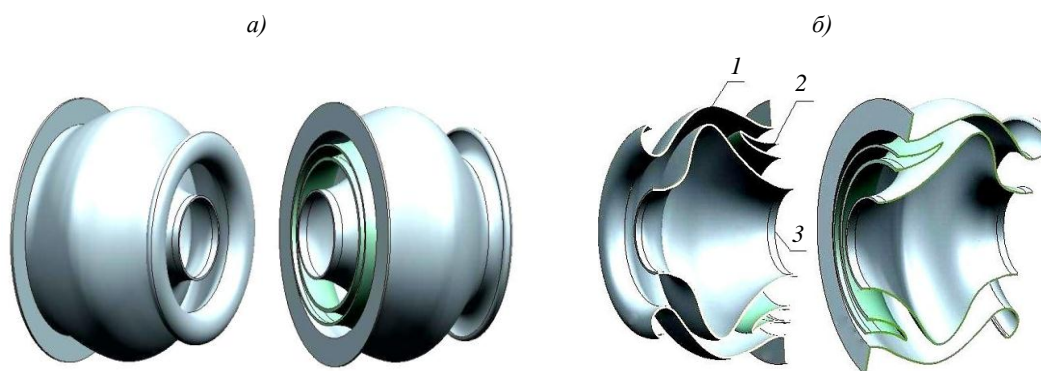


Рис. 2. Общий вид (а) и внутренняя компоновка (б) пылезащитного устройства (без «улитки»): 1 – внешняя стенка; 2 – разделитель; 3 – внутренняя стенка

Элементы ПЗУ представляют собой детали, имеющие сложные криволинейные геометрические поверхности. Детали должны соответствовать техническим условиям, заложенным в конструкторской документации, а также иметь противозррозийную защиту от твердых частиц пыли, присутствующих в атмосферном воздухе. Кроме того, необходимо обеспечить возможность разборки, очистки и сборки конструкции в условиях эксплуатации.

На качество деталей влияет ряд факторов, в первую очередь – используемый материал. Всем условиям наиболее полно удовлетворяют современные ПКМ. Оптимальным сочетанием минимальной массы и максимальных прочностных характеристик обладают ПКМ на основе полициануратных или эпоксидных связующих с наполнителем из углеродных волокон. Для предотвращения абразивного воздействия твердых частиц пыли, движущихся с большой скоростью, предусмотрено размещение на наружном теоретическом контуре деталей ПЗУ плакирующего слоя из органопластика на основе арамидной ткани [7]. Как правило, при изготовлении такого вида деталей используют препреги, которые представляют собой полимерно-волоконистую композиционную среду, находящуюся в неотвержденном состоянии [8].

На качество деталей из ПКМ также влияют способ формования и технологическая формообразующая оснастка. В соответствии с принципом многофрагментного формования детали ПЗУ разделили на отдельные фрагменты, которые выкладывали на отдельных взаимосвязанных частях оснастки. Данные фрагменты выкладывали из раскроенного на технологические карты препрега. В процессе выкладки в заготовку детали определенного количества слоев препрега необходимо проводить промежуточные подформовки при повышенной температуре, не достигающей температуры полимеризации связующего, с приложением избыточного давления. Количество подформовок зависит от толщины стенок детали. После завершения выкладки отдельные части оснастки соединяли между собой. При этом фрагменты заготовок детали также соединяли с перехлестом слоев препрега, образуя «косое» соединение. Для равнопрочности «косого» соединения величина ступеньки между соседними слоями, образующими клиновидный скос, должна превышать номинальную толщину слоя в 15–20 раз. Расчет и параметры такого соединения рассмотрены в работе [6]. Кроме того, такое соединение является поверхностью раздела и может стать тормозом на пути развития трещины [9]. По мере увеличения длины клеевого шва его прочность на растяжение и сдвиг увеличиваются [10]. Как правило, выкладка выполняется встык или внахлест до 5 мм [11]. В соответствии с расчетами прочности каждой конкретной детали возможно усиление стыка определенным количеством дополнительных слоев.

Технологию изготовления препрега с использованием растворных связующих при пропитке армирующих наполнителей широко применяли ранее и часто применяют в настоящее время. Необходимо учитывать, что при такой технологии возрастает пористость готовых деталей из ПКМ, что отрицательно сказывается на их прочности и ресурсе. Наиболее перспективным способом решения проблемы является применение при изготовлении препрегов высоковязких расплавных связующих, не содержащих летучих растворителей. Кроме того, такая технология позволяет снизить материалоемкость производства не менее чем на 15 % по сравнению с традиционными технологиями за счет отказа от растворителей и связанных с ними затрат на противопожарное оборудование взрывоопасных помещений и на усиленную вентиляцию [12]. Применение расплавных связующих также позволяет улучшить физико-механические характеристики готовых деталей, упростить технологию и сократить продолжительность их изготовления за счет уменьшения числа технологических операций [13]. Процесс приготовления расплавных связующих менее длительный, чем растворных, поскольку исключаются длительное равномерное растворение необходимого количества смол и других компонентов, а также такие операции, как получение со склада и анализ растворителей, доведение их до нужной концентрации. Кроме того, сокращается продолжительность сушки препрега до закрытия его защитными пленками. Однако расплавные полимерные связующие имеют высокую вязкость и тривиальные способы изготовления препрега окутанием наполнителя в ванну со связующим с последующим отжимом между валами для них невозможны. В этой связи для обеспечения стабильного смачивания волокон наполнителя расплавными связующими единый технологический процесс пропитки разделяют на два отдельных взаимозависимых процесса:

- изготовление пленки связующего;
- совмещение полученной пленки со жгутовым или тканевым наполнителем.

Процессы могут идти непрерывно (онлайн) и отдельно (офлайн) в зависимости от применяемого оборудования. В обоих случаях сначала на специальном устройстве (коутере) горячее жидкое расплавное связующее с помощью калиброванных полированных обогреваемых валов наносится в виде тонкой пленки на бумагу, обработанную антиадгезионным составом. Пленка должна иметь определенную расчетную поверхностную плотность связующего, которая зависит от требуемой по техническим условиям поверхностной плотности изготавливаемого препрега. Затем в онлайн-процессе пленка сразу же накатывается с двух сторон на движущуюся ленту жгутового или тканевого наполнителя и «впрессовывается» в нее с помощью давления горячих валов (каландров). Офлайн-процесс отличается тем, что препрег получают не сразу, а через какое-то время и на другой машине путем совмещения пленки связующего и наполнителя. Таким образом в обоих случаях получают так называемые прецизионные препреги, в которых массовая доля связующего и поверхностная плотность имеют небольшой разброс значений – в пределах $\pm 2\%$ [14], что необходимо для достижения заданной стабильной толщины по всей площади деталей из ПКМ, входящих в ПЗУ.

Сложная криволинейная форма деталей ПЗУ не позволяет осуществлять прямой и достоверный контроль механических свойств методами испытаний конструктивно-подобных образцов, которые можно вырезать из технологического припуска детали. Например, из технологического припуска таких деталей, как пояса лонжеронов, нервюры, панели пола или крыла, можно вырезать образцы для реальной оценки механических свойств. Поэтому при изготовлении криволинейных деталей ПЗУ большое значение приобретает точное соответствие параметров исходных препрегов требованиям технических условий.

В качестве наполнителя для изготовления препрега преимущественно используют ткани или ровинг из углеродных волокон. Это выгодно с точки зрения упруго-прочностных показателей деталей ПЗУ, массу которых определяют в основном исходя из требований жесткости, а не прочности [15]. Поэтому для наружного лакирующего слоя применяли препрег органопластика с наполнителем из арамидной ткани [7].

Соответствие препрега требованиям технических условий закладывается при изготовлении пленки связующего на коутере и зависит от поверхностной плотности наполнителя. Главная задача этого технологического процесса – достижение максимального соответствия значений поверхностной плотности получаемой пленки связующего расчетным значениям.

Поверхностную плотность пленки связующего Π (г/дм²) рассчитывают по формуле

$$\Pi = \frac{H \cdot S}{200(100-S)}, \quad (1)$$

где H – поверхностная плотность наполнителя в препреге, определяемая при входном контроле или по паспортным данным, г/м²; S – массовая доля связующего в препреге согласно техническим условиям, %.

Если в технических условиях указано значение необходимой поверхностной плотности препрега P_n (г/м²), то можно рассчитать ожидаемую поверхностную плотность препрега по формуле

$$P = \frac{H}{1-(0,01S)}, \quad (2)$$

Полученные граничные значения P сравнивают с граничными значениями P_n . Если минимальное граничное значение P меньше минимального граничного значения P_n , а максимальное граничное значение P больше максимального граничного значения P_n , то вычисляют окончательное значение поверхностной плотности пленки связующего по формуле (1), в противном случае – по формуле

$$\Pi = \frac{H \cdot S_1}{200(100-S_1)}, \quad (3)$$

где S_1 – массовая доля связующего в препреге, %, рассчитанная по формуле:

$$S_1 = 100 \left(1 - \frac{H}{P_n}\right), \quad (4)$$

Для наглядного представления о диапазоне, в котором должны находиться значения поверхностной плотности пленки связующего, на рис. 3 показан график, полученный по результатам расчетов по формулам (1)–(4). При неизменных заданных в технических условиях значениях массовой доли связующего в препреге и поверхностной плотности препрега диапазон допустимых значений поверхностной плотности пленки связующего сужается при повышении поверхностной плотности наполнителя. В онлайн- и офлайн-процессах для достижения максимального соответствия получаемых и рассчитанных значений поверхностной плотности пленки связующего опытным путем подбираются технологические параметры режимов:

- оптимальная скорость протяжки;
- порядок вращения наносящих валов (прямой или обратный);
- коэффициенты торможения валов при одновременном их вращении;

- температуры наносящих валов и узла предварительного нагрева связующего в зависимости от оптимальной вязкости связующего;
- зазоры с левой и правой сторон наносящих валов.

При совмещении пленок связующего и наполнителя важно избежать появления складок, непропитанных мест на наполнителе и выдавливания связующего по краям наполнителя.

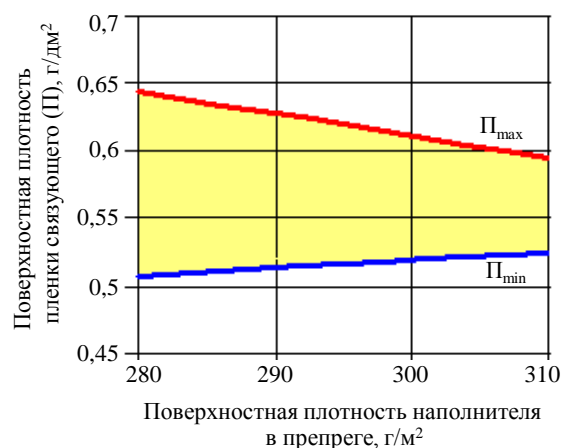


Рис. 3. Расчетный график зависимости диапазона поверхностной плотности пленки связующего от поверхностной плотности наполнителя

Для того чтобы обеспечить гладкую рабочую поверхность деталей ПЗУ и их полное соответствие расчетному теоретическому контуру, оснастка для формования должна изготавливаться из материала, позволяющего создать прочную, износостойкую и качественную рабочую поверхность и имеющего коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР), максимально близкий к КЛТР материала изготавливаемой детали. С этой точки зрения идеальным материалом для оснастки может быть углепластик с наполнителем, аналогичным наполнителю, применяемому в деталях ПЗУ, но в комплексе с высокотемпературным связующим с температурой стеклования не менее 190 °С. Но в таком случае необходимо изготавливать дорогие и сложные по форме мастер-модели из импортного высокотемпературного модельного пластика с тщательной и длительной финишной механической обработкой теоретических контуров. С учетом того, что детали ПЗУ имеют небольшие габаритные размеры (порядка 0,5–0,8 м) и сложную криволинейную форму, в данной работе в качестве компромиссного варианта сборные оснастки изготавливали из обычной малоуглеродистой стали. Хотя КЛТР стали в ~2,5 раза превышает КЛТР углепластика, возможные отклонения изготовленных деталей от теоретического контура не превысят допусков, предусмотренных конструкторской документацией. Преимущества применения стали в конструкции оснастки: легкая обработка, возможность шлифовки и полировки, стойкость к механическим повреждениям, практически неограниченное количество съемов, точная сборка без люфтов и перекосов.

Составные части оснастки должны быть тщательно подогнаны друг к другу, без зазоров и ступенек. Соединения частей оснастки должны выполняться с помощью прочного металлического крепежа быстро и надежно, а также легко отделяться при разборке. Толщина стенок и элементов оснастки должна обеспечивать жесткость всей конструкции и сохранение аэродинамического теоретического контура деталей во время формования при высокой температуре полимеризации связующего – в диапазоне

температур от 150 до 180 °С. Для возможности сборки и разборки ПЗУ, внешняя стенка должна быть выполнена в виде двух зеркально симметричных половин.

Работа проведена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Примерные схемы изготовления наиболее сложных деталей ПЗУ методом многофрагментного формования показаны на рис. 4, 6 и 8. Вся собранная оснастка с выкладкой должна располагаться целиком в вакуумном мешке (рис. 4 и 5), так как только в этом случае можно достичь необходимой герметичности при использовании разборных оснасток. Окончательную термообработку предпочтительно проводить по вакуум-автоклавной технологии под избыточным давлением, позволяющей максимально равномерно уплотнить пакет препрега и удалить воздух, который мог попасть в зоны стыковки фрагментов выкладки при сборке. В случае незначительных радиусных размеров мест перегибов детали и их сложной формы возможно применение окончательного термокомпрессионного формования с помощью предварительно изготовленного эластичного резинового вкладыша, как показано на схеме изготовления разделителя (рис. 8). При этом способе нагрев проводится в термопечи без вакуума, а необходимое давление создается при совместном тепловом расширении оснастки и резинового вкладыша. С учетом того, что оснастка должна быть массивной для обеспечения ее жесткости при термообработке, продолжительность формования целесообразно увеличивать, а скорость нагрева и охлаждения уменьшать примерно на $\sim(20-30)\%$ по сравнению с режимом отверждения применяемого препрега, отработанного на стандартных образцах. Для косвенного контроля механических свойств необходимо предусмотреть изготовление образцов-свидетелей на отдельной плоской оснастке, отверждение которых должно проходить одновременно с формованием детали. Конструкция образцов-свидетелей и параметры их испытаний должны соответствовать техническим условиям в конструкторской документации.

Внешний вид изготовленных по данным схемам деталей показан на рис. 5, 7 и 9.

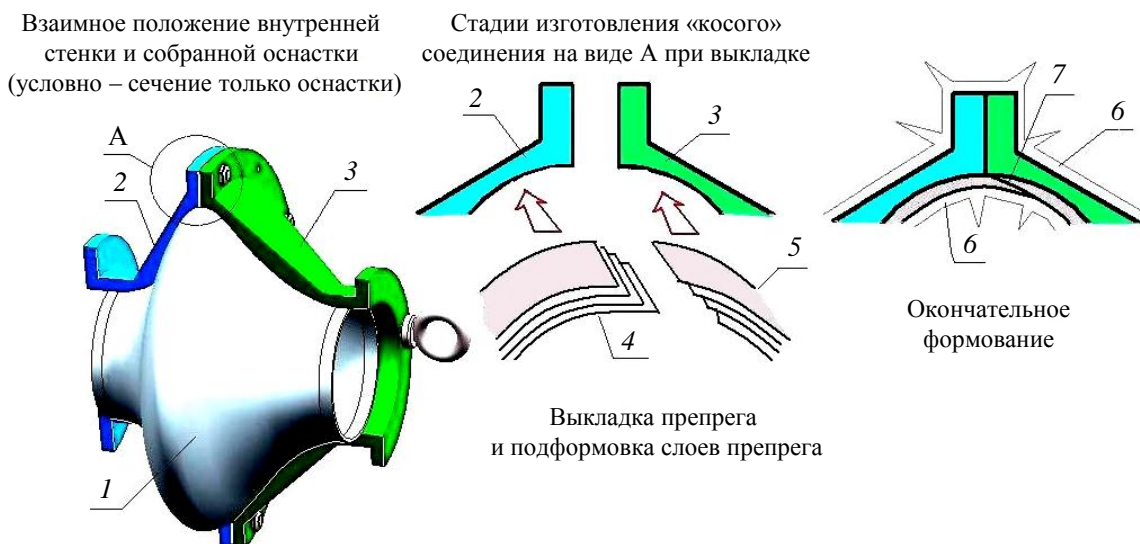


Рис. 4. Схема изготовления внутренней стенки: 1 – внутренняя стенка; 2, 3 – части технологической оснастки; 4, 5 – слои препрега; 6 – вакуумный мешок; 7 – «косое» соединение фрагментов выкладки

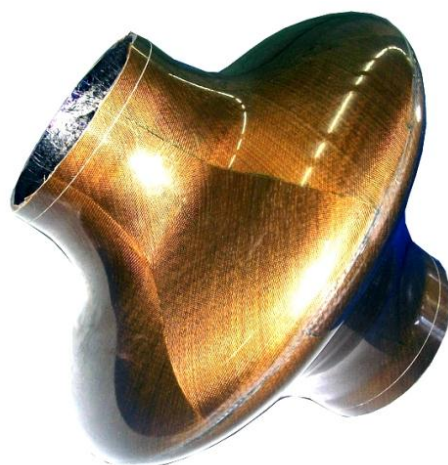
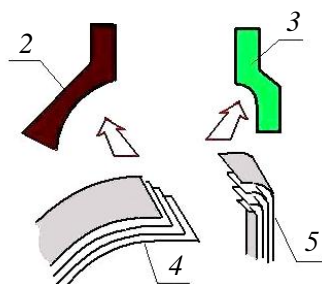
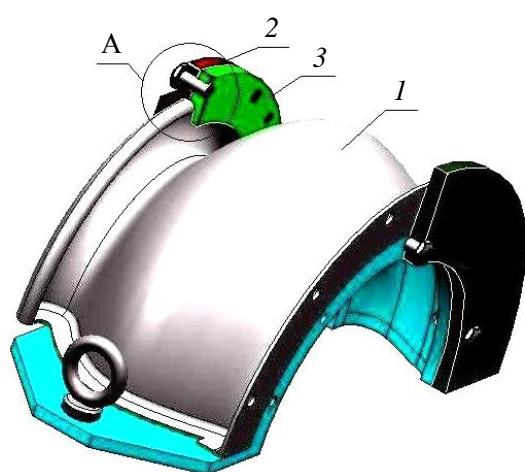


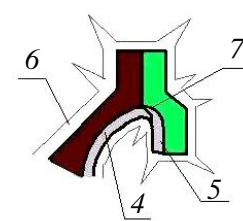
Рис. 5. Внешний вид внутренней стенки замкнутой пустотелой формы

Взаимное положение половины внешней стенки и собранной оснастки (условно – сечение только оснастки)

Стадии изготовления «косого» соединения на виде А при выкладке



Выкладка препрега и подформовка слоев препрега



Окончательное формование

Рис. 6. Схема изготовления половины внешней стенки: 1 – половина внешней стенки; 2, 3 – части технологической оснастки; 4, 5 – слои препрега; 6 – вакуумный мешок; 7 – «косое» соединение фрагментов выкладки



Рис. 7. Внешний вид половины внешней стенки

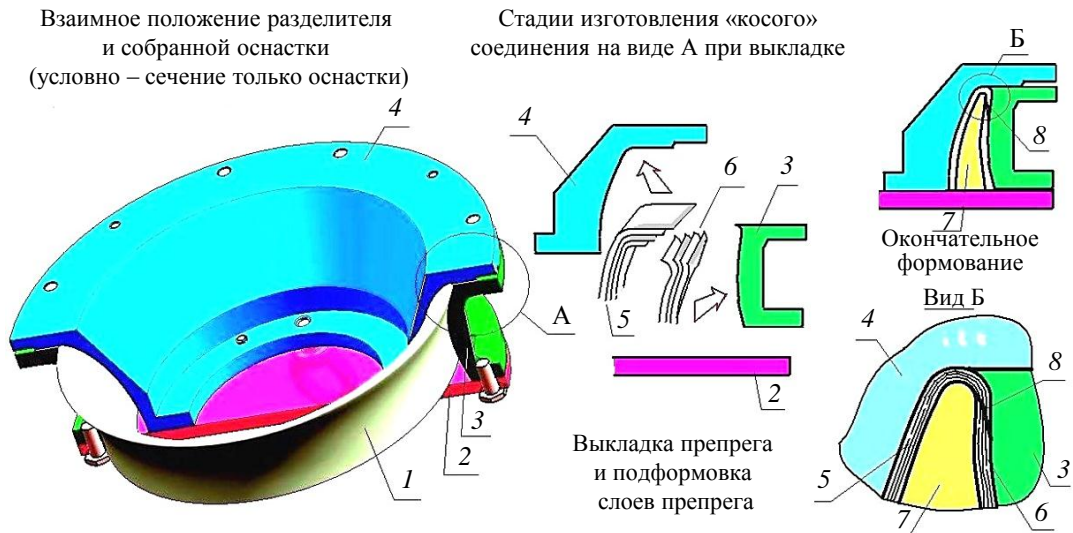


Рис. 8. Схема изготовления разделителя: 1 – разделитель; 2–4 – части технологической оснастки; 5, 6 – слои препрега; 7 – вкладыш из термостойкой резины; 8 – «косое» соединение фрагментов выкладки



Рис. 9. Внешний вид разделителя кольцевой пустотелой формы



Рис. 10. Внешний вид нижней и верхней части «улитки»

Детали частей «улитки» ПЗУ, изготовленные формованием из препрегов углепластика и органопластика и отвечающие всем необходимым требованиям, показаны на рис. 10.

Заключения

Отработанная технология многофрагментного формования позволяет изготавливать высоконагруженные криволинейные детали сложной формы из ПКМ, отвечающие всем предъявляемым конструкторской документацией требованиям. Детали выполнены из углепластиков с необходимыми характеристиками жесткости и температурной размерной стабильности при сохранении высоких показателей прочности, что по условиям эксплуатации обеспечивает неизменность геометрических размеров при больших знакопеременных силовых и температурных нагрузках [16]. Изготовленные детали прошли все предусмотренные испытания, в том числе и на оборудовании ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, при которых подтверждено их соответствие требованиям технического задания и конструкторской документации. Детали использованы для сборки ПЗУ, показавшего высокую эффективность в работе. По результатам выполненных исследований разработана официальная нормативная технологическая документация в соответствии с государственными стандартами.

Список источников

1. 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.
2. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 556 с.
3. Гардымов Г.П., Мешков Е.В., Пчелинцев А.В. и др. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. СПб.: СпецЛит, 1999. 117 с.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Усачева М.Н., Пурвин К.Э. Технологические особенности изготовления толстостенных деталей из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
5. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиационно-космической техники // *Перспективные материалы*. 2000. № 3. С. 27–36.
6. Ривин Г.Л. Ремонт конструкций из полимерных композиционных материалов летательных аппаратов: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 39 с.
7. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 1.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
8. Василевич Ю.В., Горельий К.А., Сахоненко В.М. и др. Механика препрегов – расчет изделий из армированных композиционных материалов: в 2 ч. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 1. 10 с.
9. Композиционные материалы: справочник /под общ. ред. В.В. Васильева и др. М.: Машиностроение, 1990. 14 с.
10. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. М.: Машиностроение, 1989. 78 с.
11. Джур Е.О., Кучма Л.Д., Манько Т.А. и др. Полимерные композиционные материалы в ракетно-космической технике. Киев: Вища освіта, 2003. 278 с.
12. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
13. Гуляева А.Г., Курносов А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
14. Гуляев И.Н., Сафронов А.М., Сатдинов Р.А. Сравнение онлайн- и офлайн-технологий изготовления препрегов и свойств углепластиков // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (109). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.05.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
15. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
16. Гуляев И.Н., Павловский К.А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.04.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*. Ed. A.A. Berlin. St. Petersburg: Profession, 2009, 556 p.

3. Gardymov G.P., Meshkov E.V., Pchelintsev A.V et al. *Composite materials in rocket and space apparatus building*. St. Petersburg: SpecLit, 1999, 117 p.
4. Timoshkov P.N., Khrulkov A.V., Usacheva M.N., Purvin K.E. Technological features of the manufacture of thick-walled parts of the PCM (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 07. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: April, 20 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
5. Kablov E.N. The main directions of development of materials for aerospace technology. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
6. Rivin G.L. *Repair of structures from polymer composite materials of aircraft*. Ulyanovsk: UIGTU, 2000, 39 p.
7. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
8. Vasilevich Yu.V., Gorely K.A., Sakhonenko V.M. et al. *Mechanics of prepregs – calculation of products from reinforced composite materials*: in 2 parts. Minsk: BNTU, 2016, part 1, 10 p.
9. *Composite materials*: directory. Ed. V.V. Vasilyeva et al. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 14 p.
10. Krysin V.N., Krysin M.V. *Technological processes of forming, winding and gluing structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 78 p.
11. Dzhur E.O., Kuchma L.D., Manko T.A. et al. *Polymer composite materials in rocket and space technology*. Kyiv: Vishcha osvita, 2003, 278 p.
12. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
13. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
14. Gulyaev I.N., Safronov A.M., Satdinov R.A. Comparison online and offline of prepregs manufacturing technologies and properties of carbon fiber plastics. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.
15. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
16. Gulyaev I.N., Pavlovskiy K.A. High modulus carbon plastics for civil aviation equipment (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April, 20 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-95-106.

Информация об авторах

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баранников Александр Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Макрушин Константин Владимирович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Железина Галина Федоровна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgeny A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander A. Barannikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Konstantin V. Makrushin, Lead Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Galina F. Zhelezina, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.07.2023.
The article was submitted 30.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 04.07.2023.