

УДК 629.7.02:678.67

АПРОБИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ И ВЫСОКОТОЧНЫХ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2014 В.Е. Биткин¹, А.В. Денисов¹, М.А. Денисова¹, О.Г. Жидкова¹,
Е.В. Назаров¹, О.И. Рогальская¹, А.В. Мелентьев², И.А. Мизинова²

¹ ООО «СКТБ «Пластик», г.Сызрань

² ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Поступила в редакцию 10.09.2014

Апробирован технологический комплекс изготовления силовых и высокоточных размеростабильных конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов (КМ). Комплекс включает оборудование для изготовления элементов конструкций из таких материалов и термокомпрессионной оснастки. Технология изготовления интегральных конструкций основана на принципе совмещенного во времени формования всех элементов конструкций. Формование заготовки во взаимоперпендикулярных плоскостях осуществляется за счет избыточного давления в автоклаве и упругой деформации терморасширяющихся оправок, находящихся во внутренних полостях заготовки. Произведен выбор материала терморасширяющихся формующих элементов. Проанализированы различные конструкторско-технологические решения при разработке силовых и размеростабильных элементов конструкций, изготавливаемых совмещенным формованием.

Ключевые слова: композиционные материалы, размеростабильные и силовые конструкции интегрального типа, термокомпрессионный метод, технологическая оснастка, температурные напряжения, остаточные напряжения, совмещенное формование, анизотропия, термомеханические свойства

Эффективность современных и перспективных авиакосмических летательных аппаратов (ЛА) в значительной мере определяется степенью использования в их конструкции высокопрочных высокомодульных волокнистых композиционных материалов (КМ), высокий уровень конструктивных свойств которых позволяет проектировать и изготавливать ЛА с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками. Практика внедрения КМ в конструкции

ЛА показала, что вопросы их применения в различных деталях и узлах должны решаться комплексно, на основе конструктивных решений при проектировании, переработке исходных полуфабрикатов, расчетных данных о прочности материалов в условиях эксплуатации.

Характерными особенностями КМ являются: неоднородность структуры, резкое различие физико-механических свойств армирующего наполнителя и матрицы, синхронность создания материала и конструкции. Последнее открывает возможности управления схемой армирования, ликвидации многих промежуточных операций, характерных для традиционных технологических процессов (ТП). Расширяются возможности оптимизации конструктивно-технологических решений, и снижается трудоемкость процессов переработки компонентов КМ в изделие. С другой стороны исчезает возможность отбраковки полуфабрикатов на различных этапах их производства.

Современные композитные конструкции сочетают в себе свойства, которые невозможно оптимизировать независимо друг от друга. В их числе минимальная масса, требуемые прочность

Биткин Владимир Евгеньевич, первый заместитель генерального директора – генеральный конструктор по СИ. E-mail: gksi@sktb-plastik.ru

Денисов Александр Владимирович, начальник отдела. E-mail: opriochr@sktb-plastik.ru

Денисова Марина Анатольевна, ведущий инженер-технолог. E-mail: opriochr@sktb-plastik.ru

Жидкова Ольга Геннадьевна, руководитель группы. E-mail: opriochr-prg@sktb-plastik.ru

Назаров Евгений Валериевич, начальник бюро. E-mail: opriochr@sktb-plastik.ru

Рогальская Ольга Игоревна, ведущий инженер-технолог. E-mail: opriochr@sktb-plastik.ru

Мелентьев Александр Владимирович, начальник сектора. E-mail: meleentev777@mail.ru

Мизинова Ирина Алексеевна, ведущий инженер-технолог. E-mail: mail@samspace.ru

и жесткость, надежность, долговечность, а также технологичность при изготовлении, сборке, ремонте и эксплуатации и, конечно, экономические вопросы. Обозначенные проблемные аспекты напрямую связаны с необходимостью управления комплексом технологических, а часто и конструктивно-технологических параметров, результаты которого могут оказывать влияние на конечные свойства КМ и изделия в целом [1, 2].

Технологические основы создания конструкций из КМ, обеспечивающие как реализацию замысла конструкторских решений, так и прочность самого конструкционного узла, позволили подойти к решению чрезвычайно сложных технических задач, таких как, например, равнопрочность оболочечных конструкций с изменяющейся геометрией в трехмерном пространстве и др. Проектирование конструкций из КМ основывается на традиционном подходе, т.е. учитывается опыт создания металлических изделий с большим количеством соединений, входящих деталей, с копированием силовых схем. Поиск принципиально новых конструктивно-технологических решений при создании типовых элементов конструкции является основной задачей на данном этапе – этапе широкого внедрения КМ в силовые и размеростабильные конструкции.

Конечной целью при проектировании конструкций из КМ является оптимизация схем армирования элементов конструкции, определения способов их формования. Применяемые в настоящее время методы создания конструкций из КМ не в полной мере отвечают требованиям по обеспечению размерной стабильности, прочности и жесткости конструкций, а применение механических соединений снижает эффективность использования КМ. Для увеличения ресурса, живучести и повышения остаточной прочности размеростабильных конструкций в настоящее время активно используется концепция создания конструкций интегрального типа [3]. К достоинствам таких конструкций можно отнести:

- дополнительное уменьшение массы благодаря снижению количества механических соединений;
- снижение себестоимости за счет исключения всех производственных операций, связанных с конструктивными разъемами, т.е. подгонки, сверления, сборки;
- сокращение технологического цикла, поскольку детали, входящие в конструкцию, формируются одновременно в конструкции, при этом объем сборочных работ сводится к минимуму.

Многоступенчатость традиционной технологии изготовления конструкций из КМ

приводит к накоплению технологических дефектов и, как следствие, к значительному разбросу прочностных и термомеханических свойств, усложнению расчетов и проектирования, и увеличению коэффициентов запаса прочности. Современная технология создания интегральных конструкций в основном лишена этих недостатков. В основу разработки технологических способов изготовления положен принцип совмещенного во времени формования всех элементов конструкции. Основной особенностью способа изготовления является применение термокомпрессионного метода в комбинации с автоклавным формованием изделий из КМ. Принцип такой комбинации заключается в том, что формование пакета препрегов во взаимно перпендикулярных плоскостях осуществляется избыточным давлением в автоклаве и упругой деформацией терморасширяющихся оправок, помещенных во внутренние полости заготовки.

Вертикальные стенки силового набора формируются за счет термического расширения специальных оправок и вкладышей. Основная задача при изготовлении такой оснастки – воспроизведение контура внутренней полости конструкции в необжатом состоянии пакета препрегов (возможность сборки неотвержденной конструкции) и создание необходимого давления формования при нагреве оправок до температуры отверждения связующего компонента материала. Решение поставленной задачи заключается в правильном подборе геометрических размеров и в достижении необходимого коэффициента термического расширения в изготовленных оправках и вкладышах, что обеспечивает гарантированную пропрессовку пакета композита. Материал для изготовления терморасширяющихся оправок должен обладать следующими свойствами:

- высокой эластичностью, необходимой для передачи давления равномерно по всем направлениям;
- значениями коэффициента линейного термического расширения в пределах $2-4 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, постоянными в процессе эксплуатации;
- стойкостью к продуктам, выделяющимся из изделия в процессе формования;
- стабильностью свойств при циклическом воздействии температуры (до 200°C) и давления (до 9 кгс/см^2);
- твердостью в пределах 35-50 единиц по Шору А;
- хорошей теплопроводностью.

Анализ свойств эластомеров показал, что указанными свойствами обладают только материалы на основе силиконовой резины. По результатам обзора выпускаемых

промышленностью материалов были выбраны три, наиболее полно удовлетворяющих предъявленным требованиям: силиконовый герметик «Виксинт У-2-28»; заливочная композиция «Aircast 3700»; силикон формовочный

«Пентэласт-750А». Из выбранных материалов были изготовлены образцы для определения физико-механических, теплофизических, физико-химических и эксплуатационных свойств. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства силиконовых компаундов

Марка силиконового компаунда	Виксинт У-2-28	Aircast 3700	Пентэласт-750А
количество компонентов и их соотношения	Три: паста У-2 – 100 м.ч. + катализатор №28 – 1-2 м.ч. + ГФЖ 136-41 – 0,7-2 м.ч.	Два: часть А – 100 м.ч. часть В – 12 м.ч.	Два: компонент А – 1 м.ч. компонент Б – 1 м.ч.
максим. температура эксплуатации, °С	250	232	250
усредненная вязкость, при 20°С, СПз	н/д	15000	8000÷20000
время жизни, ч	3÷8 при 20 °С	1 при 25 °С	1,5÷2 при 23 °С
условная прочность при разрыве, МПа	не менее 1,9	4,48	3,0÷3,5
относительное удлинение при разрыве, %	не менее 220	180	300÷500
твердость по Шору А, условных единиц	35÷50	45÷55	38÷43
коэфф. термического расширения, °С ⁻¹	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
плотность, г/см ³	2,2	1,25	1,12
время отверждения, ч	24÷72 при 20 °С	24 при 25 °С	24 при 25 °С конечные мех. свойства через 72 ч.
усадка, %	не более 4	0	менее 0,05

С целью определения технологичности проводились работы по изготовлению терморасширяющихся оправок из выбранных материалов. Проведенные работы показали, что наибольшей технологичностью обладают материалы «Пентэласт-750А» и «Aircast 3700» вследствие меньшей вязкости компонентов, чем у «Виксинт У-2-28». Фактически технология изготовления оправок из материалов «Пентэласт-750А» и «Aircast 3700» состоит из смешивания необходимого количества компонентов, вакуумирования материала для удаления захваченного при перемешивании воздуха и заливки материала в заливочную форму. При этом изготовленные оправки имеют однородную структуру, а возможные дефекты оправок представляют собой недолив вследствие недозаполнения формы или затрудненного выхода воздуха, вытесняемого из формы заливаемым материалом.

Процесс изготовления терморасширяющихся оправок из силиконового герметика «Виксинт У-2-28» отличается большей трудоемкостью. Высокая вязкость пасты У-2, являющейся основным компонентом данного

материала, приводит к необходимости использования дополнительного оборудования для смешивания компонентов в вакууме и подачи приготовленного компаунда в заливочные формы. Введение в пасту У-2 определенного количества растворителя позволяет регулировать усадку материала, что при неизменной форме внутренней поверхности матриц в условиях опытного производства дает возможность корректировки геометрии сечений получаемых оправок и вкладышей в одной и той же технологической оснастке.

Проведенная отработка технологии формования образцов интегрального типа из КМ с использованием терморасширяющихся оправок, изготовленных из силиконового герметика «Виксинт У-2-28», заливочной композиции «Aircast 3700» и силикона формовочного «Пентэласт-750А» показала, что данные силиконовые компаунды полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к материалу терморасширяющихся формующих элементов, и применимы для их изготовления. Неоспоримым преимуществом применения силиконовых компаундов для получения формующих терморасширяющихся

оправок и вкладышей является их полная ремонтпригодность, что в условиях опытного производства значительно сокращает затраты на обработку ТП изготовления изделия.

При разработке и изготовлении конструкций интегрального типа вопросы проектирования,

разработки технологии изготовления и конструирования технологической оснастки неразрывно связаны между собой. Конструкции и материалы технологической оснастки непосредственно влияют на качество и стоимость изготовленных на ней деталей из КМ [2].



Рис. 1. Фотография терморасширяющейся оправки (а) и матрицы для её изготовления (б)

После отработки технологии изготовления интегральных конструкций на образцах были проведены работы по апробированию разработанного технологического комплекса при изготовлении интегральных конструкций различного типа. На первом этапе проводилась отработка технологии изготовления размеростабильной несущей конструкции корпуса объектива, представляющего собой цилиндрическую оболочку с фланцами, подкрепленную с наружной стороны взаимно-перпендикулярными ребрами жесткости, выполненную из углепластика КМУ-4. Процесс изготовления интегральной конструкции корпуса объектива представлен на рис. 2. При формовании изделия цилиндрическая оболочка конструкции и полки подкрепляющих ребер формируется избыточным давлением, создаваемым в автоклаве, а фланцы и стенки ребер в процессе формования обжимаются в радиальном и тангенциальном направлениях за

счет «стесненного» термического расширения силиконо-вых оправок, ограниченных по всем торцам формуемого изделия.

Базовый технологический процесс изготовления изделия является одностадийным, что подразумевает одновременное формование и отверждение всех силовых элементов корпуса (обшивки, фланцы и ребра жесткости) с использованием автоклава. Структурно весь технологический процесс можно разбить на несколько блоков, включающих в себя технологические операции, связанные между собой по организационно-цеховому принципу. Это позволяет разделить технологический цикл изготовления корпуса, как по месту выполнения операций, так и во времени. На рис. 3 приведена схема, отображающая последовательно-параллельное выполнение основных технологических операций изготовления корпуса.



а)



б)

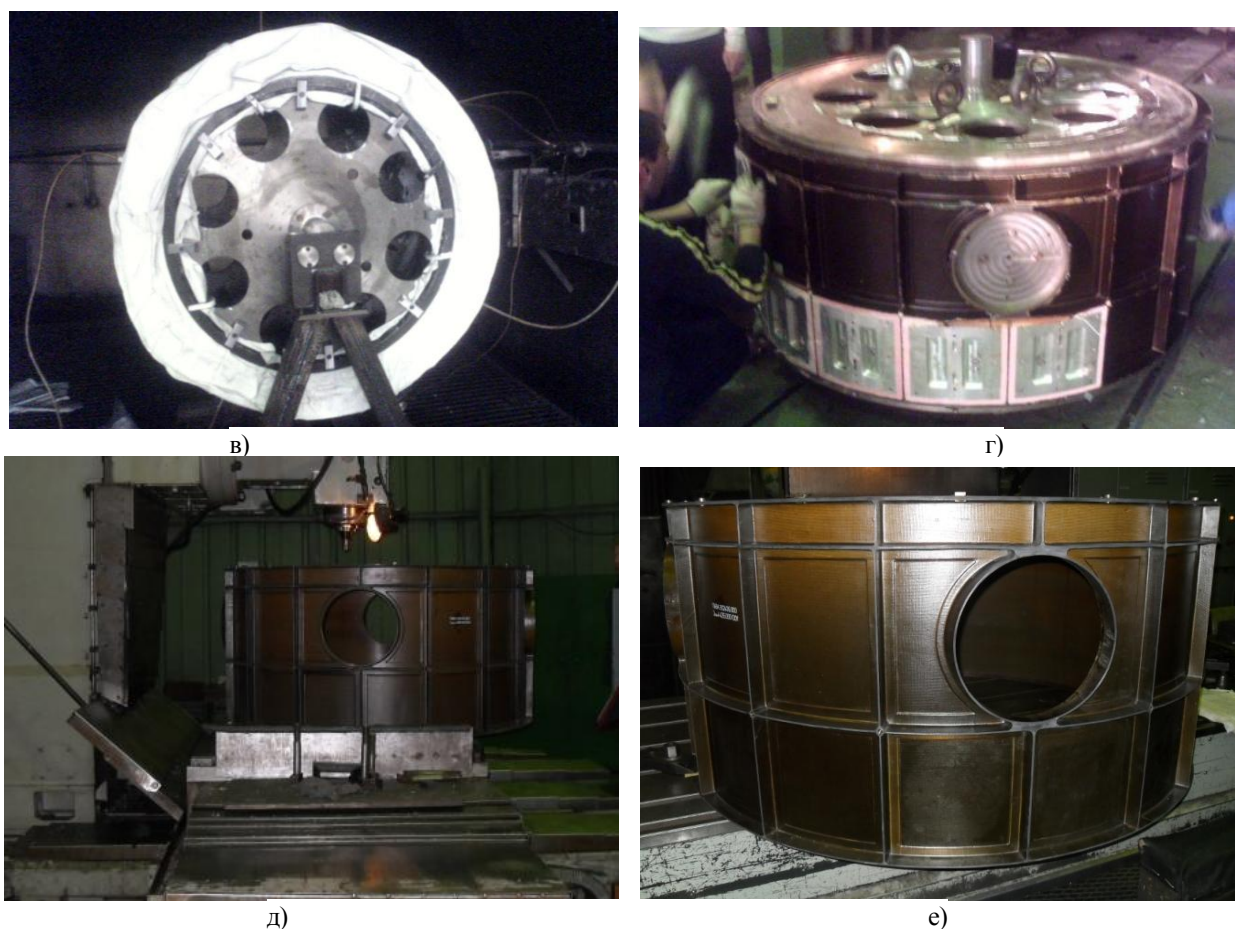


Рис. 2. Фотографии размеростабильной несущей конструкции корпуса объектива на различных этапах изготовления:

а – укладка на форму слоев препрега углеленты, формирующих оболочку и фланцы изделия; б – собранная на форме конструкция в неотвержденном состоянии; в – конструкция, помещенная в автоклав; г – извлечение терморасширяющихся оправок из полостей изделия после формования; д – механическая обработка изделия; е – готовое изделие

При отработке технологии изготовления размеростабильных конструкций проверялись параметры ТП (содержание и последовательность операций, геометрические и физико-механические параметры оснастки и т.д.), геометрические параметры конструкции, а также термоупругие характеристики получаемого композита в различных силовых и размеростабильных элементах. При изготовлении конструкций интегрального типа возможно проведение предварительного частичного отверждения некоторых элементов конструкции или ее частей. Отработка данной технологии была проведена при изготовлении центрального зеркала космического радиотелескопа «Спектр-Р» (рис. 4). С целью исключения осмоления в местах расположения подкрепляющих ребер, металлизированной стеклоткани, приформовываемой к рабочей поверхности оболочки зеркала, формование изделия проводилось в 2 этапа. На первом этапе производилось формование отражающей оболочки изделия, затем на отформованную отражающую поверхность антенны приформовывались ребра жесткости. Испытания на отрыв

подкрепляющих ребер подтвердили принципиальную возможность проведения процесса двухстадийного формования.

Основные параметры композита, получаемого в процессе формования конструкции, влияющие на его термоупругие константы и всецело зависящие от технологии его переработки – это объемное содержание связующего в композите и схемы армирования. Требуемую точность выдерживания этих параметров необходимо рассчитывать и задавать для них пределы технологических погрешностей. Исходя из этих позиций, наиболее целесообразная следующая последовательность отработки ТП:

- формование и испытания образцов однонаправленного материала в оснастке, используемой для формования заготовки изделия. На этом этапе определяются термоупругие константы монослоя композита, реально получаемого в рабочей оснастке;

- формование и испытание образцов в форме сечений силовых элементов конструкции, изготовленных в рабочей оснастке, для проверки свойств материала с целью корректировки

схемы армирования, и пооперационная обработка ТП;

- формование фрагмента конструкции изделия и проверка термоупругих констант образцов, вырезанных из изготовленных фрагментов под разными направлениями. На данном этапе отрабатывается последовательность операций ТП в целом и определяется степень влияния технологии на характеристики конструкции. При отработке последовательности операций не рекомендуется использовать другие материалы, так как у различных материалов в сыром состоянии разные упруго-жесткостные свойства и адгезионная способность, что очень важно в процессе выкладки материала;

- формование опытного изделия и снятие параметров размеростабильности.

При отклонении от расчетных данных должна быть проверена однородность параметров в различных зонах конструкции изделия. На основании этого этапа осуществляется окончательная корректировка параметров ТП изготовления. Апробирование технологического комплекса проведено на базе Сызранского специального конструкторско-технологического бюро «Пластик» при изготовлении силовых и размеростабильных конструкций интегрального типа различного назначения (рис. 5): цилиндрических, конических и коробчатых корпусов; панелей, кронштейнов; платформ; параболических зеркал и др.

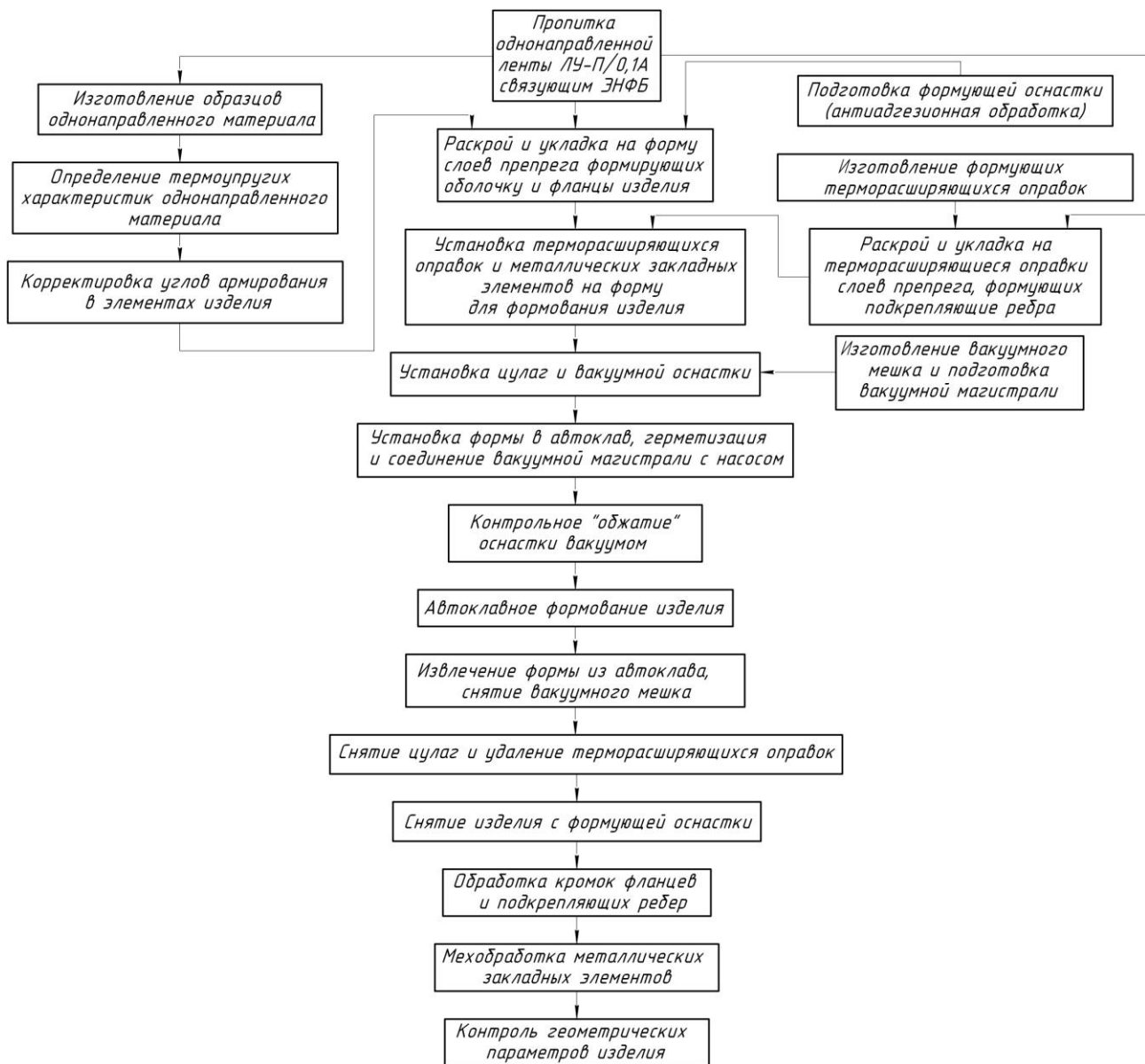


Рис. 3. Выполнение технологических операций изготовления корпуса



Рис. 4. Фотографии фрагмента оснастки (а) и фрагмента размеростабильной углепластиковой интегральной конструкции центрального зеркала $D=2,6\text{м}$ радиотелескопа «Спектр-Р»



Рис. 5. Фотографии конструкций интегрального типа:

а – размеростабильная несущая конструкция объектива оптико-электронного комплекса КА; б – основание зеркальной системы КА; в – зеркало многолучевой антенны; г – кронштейн фокального узла оптико-электронного комплекса

Выводы: разработанный технологический комплекс, включающий оборудование для изготовления размеростабильных конструкций, специальную термокомпрессионную оснастку в виде профилированных оправок и вкладышей из силиконовой резины и ограничительных и фиксирующих элементов, а также оборудование для изготовления таких оправок и оснастки для формования, позволяет изготавливать широкую номенклатуру изделий различного назначения и обладает целым рядом преимуществ перед

традиционно используемыми методами автоклавно-вакуумного формования изделий из КМ, к которым относятся:

- процесс изготовления изделий имеет поперечно-раздельную структуру, что позволяет одновременно выполнять различные операции выкладки препрегов в разных производственных помещениях и использовать для этого универсальное автоматизированное оборудование (намоточное, выкладочное и др.);

- структура технологического процесса позволяет производить корректировку схемы армирования, не меняя конфигурацию формирующих оправок и вкладышей из силиконовой резины;

- комплект технологической оснастки позволяет изготавливать профилированные силиконовые оправки и вкладыши без применения специального оборудования, используемого в резинотехнической промышленности (пресса, прокатные валки и т.п.);

- комплект технологической оснастки допускает изменение контуров сечения силиконовых оправок в случае корректировки толщин композитных элементов конструкции антенны;

- комплект специальных силиконовых оправок и вкладышей, изготовленных в разработанной оснастке, может использоваться многократно. В случае местных повреждений силиконовых изделий их можно восстанавливать в условиях опытного производства;

- при необходимости перехода от опытного производства к мелкосерийному наращивание темпов производства изделий обеспечивается простым увеличением количества единиц технологической оснастки.

Разработанный технологический комплекс относится к ресурсосберегающим, имеет гибкую

структуру, что делает его перспективным в условиях современного производства изделий из композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Молодцов, Г.А. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов. – М.: Машиностроение, 2000. 352 с.
2. Преображенский, И.Н. Прочность, жесткость и технологичность деформируемых несущих конструкций / И.Н. Преображенский, П.М. Преображенский // Научно-технический прогресс в машиностроении. Сер. Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов. 1991. Вып. 29. С. 3-17.
3. Биткина, Е.В. Конструктивно-технологические методы создания размеростабильных космических композитных конструкций интегрального типа / Е.В. Биткина, А.В. Денисов, В.Е. Биткин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, №4(2). С. 555-560.
4. Виноградов, В.М. Принципы конструирования оснастки для термокомпрессионного метода формования / В.М. Виноградов, Г.М. Шишков, И.Л. Ильина, В.Н. Мырзин // Технология. Сер. Конструкции из композиционных материалов. 1990. Вып. 2. С. 53-54.

APPROBATION OF THE TECHNOLOGICAL COMPLEX OF PRODUCTION THE POWER AND HIGH-PRECISION SIZE-STABLE INTEGRATED TYPE CONSTRUCTION ELEMENTS FROM FIBROUS COMPOSITE MATERIALS

© 2014 V.E. Bitkin¹, A.V. Denisov¹, M. A. Denisova¹, O.G. Zhidkova¹, E.V. Nazarov¹, O.I. Rogalskaya¹, A.V. Melentyev², I.A. Mizinova²

¹ JSC SKTB “Plastik”, Syzran

² SSP RCC “TsSKB-Progress”, Samara

The technological complex of production the power and high-precision size-stable integrated type construction from fibrous composite materials (CM) is approved. The complex includes the equipment for production the elements of constructions from such materials and thermal-compression equipment. Technologies of processing the integrated constructions are based on the principle of formation all elements of constructions combined in time. Preparation formation in the co-perpendicular planes is carried out by excessive pressure in the autoclave and elastic deformation of thermoextending mandrels which are in internal cavities of preparation. The choice of material of thermoextending forming elements is made. Various design-technological decisions are analyzed when developing power and size-stable elements of constructions made by combined formation.

Key words: *composite materials, size-stable and power constructions of integrated type, thermal-compression method, industrial equipment, temperature stress, residual stress, combined formation, anisotropy, thermomechanical properties*

Vladimir Bitkin, First Deputy General Director – Chief Designer. E-mail: gksi@sktb-plastik.ru; Alexander Denisov, Head of the Department. E-mail: opriokr@sktb-plastik.ru; Marina Denisova, Leading Engineer Technologist. E-mail: opriokr@sktb-plastik.ru; Olga Zhidkova, Chief of the Group. E-mail: opriokr-prg@sktb-plastik.ru; Evgenit Nazarov, Chief of the Bureau. E-mail: opriokr@sktb-plastik.ru; Olga Rogalskaya, Leading Engineer Technologist. E-mail: opriokr@sktb-plastik.ru; Alexander Melentyev, Chief of the Sector. E-mail: meleentev777@mail.ru; Irina Mizinova, Leading Engineer Technologist. E-mail: mail@samspace.ru