

УДК 629.7.02:678.67

## КОНСТРУКТИВНО - ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

© 2012 Е.В. Биткина<sup>1</sup>, А.В. Денисов<sup>2</sup>, В.Е. Биткин<sup>2</sup><sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВПО Самарский государственный технический университет в г. Сызрани<sup>2</sup> ОАО "Пластик", Самарская обл., Сызрань

Поступила в редакцию 10.10.2012

В работе рассмотрены вопросы создания и изготовления авиационно-космических конструкций интегрального типа из композиционных материалов. 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, термокомпенсационный метод, технологическая оснастка, температурные напряжения, остаточные напряжения, силиконовая спецоснастка, совмещенное формование, технологические погрешности, анизотропия, термомеханические свойства.

Эффективность современных и перспективных летательных авиационно-космических аппаратов в значительной мере определяется степенью использования в их конструкциях высокопрочных высокомодульных волокнистых (КМ), высокий уровень конструктивных свойств которых позволяет проектировать и изготавливать летательные аппараты (ЛА) с высокими эксплуатационно-техническими характеристиками. Практика внедрения КМ в производство ЛА, показала, что вопросы их применения, для тех или иных деталей и узлов, должны решаться комплексно, на основе конструктивных решений при проектировании, расчетных данных о прочности в условиях эксплуатации и технологии переработки исходных полуфабрикатов. Следует отметить, что 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. Это значительно расширяет возможности оптимизации конструктивно-технологических решений и снижает трудоемкость процессов переработки компонентов КМ в изделии. С другой стороны исчезает возможность отбраков-

ки 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, необходимая прочность 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].

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. Следует отметить, что проектирование конструкций из КМ основывается на традиционном подходе, т.е. с учетом опыта к созданию 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 арми-

*Биткина Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: elena\_bitkina@mail.ru*

*Денисов Александр Владимирович, начальник отдела. E-mail: opriokr-n@plastmass.com*

*Биткин Владимир Евгеньевич, главный конструктор по спец.изделиям. E-mail: gksi@plastmass.com*

рования элементов конструкции, определения способов формирования и формования материалов. Разработанные 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 [2]. К достоинствам таких конструкций можно отнести дополнительное уменьшение массы, благодаря снижению 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. Следует отметить, что 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 [3]. В основу разработки технологических способов изготовления положен принцип совмещенного по времени формования всех

элементов конструкции. Наиболее полно интегральность выражается в конструкциях рефлекторов размеростабильных космических антенн, особенно, когда все элементы должны быть выполнены из одного материала - углепластика, обладающего низким коэффициентом температурного расширения (рис. 1).

Основной особенностью способа изготовления является применение термо-компенсационного метода в комбинации с автоклавным формованием изделия из КМ.

Принцип такой комбинации заключается в том, что формование пакета композита во взаимно перпендикулярных плоскостях осуществляется избыточным давлением в автоклаве и упругой деформацией терморасширяющихся оправок, помещенных во внутренних полостях изделия. А именно, в изготавливаемой конструкции антенны, которая представляет собой параболическую незамкнутую оболочку, с односторонним подкрепленным набором взаимно перпендикулярных ребер, обшивка отражающей поверхности рефлектора формируется избыточным давлением, создаваемым в автоклаве, а стенки ребер в радиальном и тангенциальном направлениях обжимаются в процессе формования за счет "стесненного" термического расширения силиконовых оправок, ограниченных по всем торцам формируемого изделия.

С другой стороны, оптимизация конструкций панелей, с позиции достижения необходимой размерной стабильности при заданных параметрах внешнего воздействия, приводит к усложнению конструкции зеркала, а, соответственно, и к увеличению количества типоразмеров внутренних



Рис. 1. Фрагмент размеростабильной углепластиковой интегральной конструкции центрального зеркала  $D=2,6$ м радиотелескопа «Спектр-Р»

оправок из кремнийорганических каучуков. С целью упрощения технологической оснастки и сокращения цикла подготовки опытного производства, разработка технологической оснастки проводилась в рамках максимальной унификации типовых узлов, таких как узлы стыка продольных и поперечных ребер жесткости.

Кроме того, положительный эффект в снижении трудоемкости изготовления оснастки был достигнут в результате получения оптимального количества радиальных и окружных ребер жесткости.

Следует отметить, что непосредственно сама технология изготовления конструкции антенны, вместе с разработанным комплектом формирующих оправок из силиконовой резины, а также специальные матрицы и приспособления для изготовления силиконовых оправок составляют единый технологический комплекс, адаптированный к опытному производству размеростабильных конструкций антенн.

Анализ зон переходов элементов конструкции интегрального типа, расположенных под прямым углом (обшивка - ребро жесткости), показал, что из-за технологических дефектов и концентраторов напряжений в местах соединений возможно получение пониженной прочности. Снизить влияние указанных факторов можно технологической обработкой с целью лучшей пропрессовки материала в зоне перехода эластичной оснастки, применением клеев, прошивкой сопрягаемых элементов перед формованием, применением вкладышей, армирующих элементов, снижающих дефекты и уменьшающих концентрацию напряжений при отрыве в зоне перехода (рис. 2).

При серийном производстве, в зонах перехода элементов, трудоемкое заполнение канавок жгутами целесообразно заменить выкладкой заблаговременно сформованного армирующего элемента.

При изготовлении конструкций интегрального типа возможно использование предварительного частичного отверждения некоторых элементов конструкции или ее частей. С этой целью была проведена экспериментальная проверка двухстадийного формования конструкции антенны. На отформованную отражающую поверхность антенны приформовывались ребра жесткости.

Испытания на отрыв подкрепляющих ребер подтвердили принципиальную возможность этого направления.

Как отмечалось выше, вертикальные стенки силового набора формируются за счет термического расширения специальных оправок и вкладышей из силиконовой резины. Основная задача при изготовлении такой оснастки – это воспроизведение контура внутренней полости конструкции в необжатом состоянии набора композита (возможность сборки неотвержденного изделия) и создание необходимого давления формования при нагреве таких оправок до температуры отверждения связующего компонента материала. Решение поставленной задачи заключается в правильном подборе геометрических размеров силиконовых оправок и вкладышей, а также в достижении необходимого коэффициента термического расширения у изготовленных оправок и вкладышей, что обеспечивает гарантированную пропрессовку пакета компози-



Рис. 2. Фрагмент композитной конструкции подкрепленной панели интегрального типа

та. Характер опытного производства требует также возможности корректировки (практически подбора) геометрических размеров оправок и вкладышей, заполняющих внутренние полости изделия.

Для решения поставленной задачи, в качестве материала терморасширяющейся оснастки используется паста – герметик на основе кремнийорганических каучуков типа ВИКСИНТ. Коэффициент линейного термического расширения в твердом состоянии у такой резины составляет  $(3 \dots 5) 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , кроме того, такие оправки обладают необходимой термохимической стойкостью к продуктам полимеризации связующего типа ЭНФБ.

Использование сырья в виде пасты со строго определенным количеством растворителя необходимо для точного воспроизведения формы резиновых изделий при неизменной форме внутренней поверхности матриц, что в условиях опытного производства дает возможность корректировки геометрии сечений получаемых оправок и вкладышей в одной и той же технологической оснастке за счет управляемой усадки материала оправок. Использование сырой резины в листовом поставочном состоянии (резины марки ИРП) повлечет за собой применение прессформ для каждого типоразмера оправок и вкладышей и применение прессового и прокатного оборудования.

Матрицы позволяют изготавливать силиконовые оправки и вкладыши с заданным профилем сечений, при этом длину оправки, в случае необходимости, можно получать при склеивании нескольких фрагментов резинового изделия, что сокращает количество матриц для формования силиконовой спецоснастки.

Изготовление (запрессовка) резиновых оправок и вкладышей в матрицах осуществляется в вакууме, при помощи специального шприца, который одновременно является и смесителем компонентов резины.

Неоспоримым преимуществом такого способа получения формующих терморасширяющихся оправок и вкладышей является их полная ремонтпригодность, что в условиях опытного производства значительно сокращает затраты на отработку технологического процесса изготовления изделия.

Следует отметить, что 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.

Следствием этой зависимости являются общие и специфические требования к технологической оснастке. К основным из них можно отнести высокую прочность и жесткость, близость КЛТР материала оснастки и формуемого изделия, отсутствие в силиконовых оправках наличия пустот и закрытых объемов, легкость, транспортабельность, дешевизна, универсальность, пригодность к автоматизации работ с КМ [4, 5]. Кроме того, тенденция создания из КМ все более крупногабаритных изделий накладывает жесткие ограничения по точности и чистоте поверхностей конструкций, а значит, и рабочих поверхностей оснастки. Малейшие неточности формы и размеров рабочих элементов оснастки могут привести к браку изделия, например, из-за непропрессовки тонкостенных элементов конструкции или непрочности при сборочных работах, в случае интегральных конструкций. Значительное различие величин КЛТР изделий и оснастки неблагоприятно сказывается на качестве и состоянии как изделия, так и оснастки.

При сложной форме формованного изделия, что характерно, в первую очередь, для интегральных конструкций, в результате взаимодействия “изделие-оснастка” в изделии возникают температурные напряжения, а после распрессовки - остаточные напряжения, что критично может сказаться на выносливости и живучести конструкции. При недостаточной прочности оснастки, возникающие температурные напряжения могут привести к необратимой деформации, как оснастки, так и изделия. Частные приемы снижения температурных напряжений, в целом, проблему не решают. Переход в данном случае от металлической оснастки к композитной представляется более перспективным [5, 6].

При отработке технологии изготовления размеростабильных конструкций антенн, должны проверяться не только параметры технологического процесса (содержание и последовательность операций, геометрические и физико-механические параметры оснастки и т.д.), но и геометрические параметры конструкции, а также термоупругие характеристики получаемого композита в различных силовых и размеростабильных элементах. Основные параметры композита, получаемого в процессе формования конструкции антенн, влияющие на его термоупругие константы и всецело зависящие от технологии переработки КМ - это объемное содержание связующего в композите и схемы армирования. Требуемую точность выдерживания этих параметров необходимо рассчитывать и задавать для них пределы технологических погрешностей [7].

Исходя из этих позиций, наиболее целесообразная последовательность отработки техноло-

гии может быть представлена в следующей последовательности:

- формование и испытания образцов однонаправленного материала в оснастке, используемой для формования 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 отработка технологического процесса;

- формование фрагмента конструкции антенны и проверка термоупругих констант образцов, вырезанных из изготовленных фрагментов под разными направлениями. На данном этапе отрабатывается последовательность операций технологического процесса в целом и определяется степень влияния технологии на характеристики конструкции. При отработке последовательности операций не рекомендуется использовать другие материалы, т.к. 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 антенны. На основании этого этапа осуществляется окончательная корректировка параметров технологии изготовления.

Результаты проведенной работы показывают, что разработанный технологический комплекс, включающий в себя непосредственно технологический процесс изготовления размеростабильных космических конструкций антенн, специальную термокомпенсационную оснастку в виде профилированных оправок и вкладышей из силиконовой резины и ограничительных и фиксирующих элементов, а также способ изготовления таких оправок и оснастки для формования, обладает целым рядом преимуществ перед традиционно используемыми методами автоклавно-вакуумного формования изделий из КМ. К числу таких преимуществ можно отнести следующие:

- процесс изготовления изделий имеет пооперационно-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 мелко-серийному наращивание темпов производства изделий обеспечивается простым увеличением количества единиц технологической оснастки.

Следует отметить, что разработанный технологический комплекс относится к ресурсосберегающим, имеет гибкую структуру, что делает его перспективным в условиях современного производства изделий из композиционных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преображенский И.Н., Преображенский П.И. Прочность, жесткость и технологичность деформируемых несущих конструкций. - В сб.: Научно-технический прогресс в машиностроении. Сер. Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов, вып. 29, 1991. С. 3 - 17.
2. Щербаков В.Т. Проектирование типовых высоконагруженных конструкций интегрального типа из полимерных композиционных материалов // Техника, экономика, информация: Межотр. науч.-техн. сб. - М.: Конструкции из композиционных материалов, вып. 2, 1985. С. 19 - 24.
3. Щербаков В.Т. Конструкторско-технологические решения при создании деталей и агрегатов из композиционных материалов. // Технология. Сер. Конструкции из композиционных материалов / Всесоюзный научно-исследовательский институт межотраслевой информации. Конструкторское бюро машиностроения. Научно-производственное объединение прикладной механики, вып. 1, 1990. С. 17 - 22.
4. Виноградов В.М., Мымрин В.Н., Шишков Г.М., Хан А.А. Конструирование и расчет эластичных элементов для термокомпрессионного формования // Механика композитных материалов. 1987. №2. С. 356 - 358.
5. Виноградов В.М., Шишков Г.М., Ильина И.Л., Мымрин В.Н. Принципы конструирования оснастки для термокомпрессионного метода формования // В сб.: Технология. Сер. Конструкции из композиционных

- материалов, 1990, вып. 2. С. 53 - 54.
6. Боголюбов В.С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 183 с.
7. Молодцов Г. А., Биткин В. Е., Симонов В. Ф., Урмансов Ф. Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.

## **DESIGN - ENGINEERING METHODS OF CREATING OF DIMENSIONALLY STABLE SPACE STRUCTURES OF INTEGRATED TYPE MADE OF COMPOSITE MATERIALS**

© 2012 E.V. Bitkina<sup>1</sup>, A.V. Denisov<sup>2</sup>, V.E. Bitkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Syzran Branch of Samara State Technical University

<sup>2</sup> Open Joint-Stock Company "Plastic", Samara region, Syzran

The questions of creation and manufacturing of aerospace constructions of integrated type of composite materials are considered in this article. We analysed various design-engineering solutions during the development of load-carrying and dimensionally stable structures produced by combined molding.

Key words: composite materials, dimensionally stable structures of integrated type, load-carrying structures of integrated type, thermo-compensation method, industrial equipment (tooling), thermal stress, residual stress, silicone special equipment, combined molding, technological, anisotropy, thermo-mechanical properties.

---

*Elena Bitkina, Candidate of Technics, Associate Professor.*

*E-mail: elena\_bitkina@mail.ru*

*Alexandr Denisov, Chief of Department.*

*E-mail: opriokr-n@plastmass.com*

*Vladimir Bitkin, Chief Designer. E-mail: gksi@plastmass.com*