

УДК 629.7.02:678.67

doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-54-68

Выбор схемы подкрепления параболической антенны из композиционных материалов с эллиптической линией раскрыва

А.Л. Галиновский¹, А.В. Денисов², Е.А. Гаврилова², С.А. Гордеев²,
С.А. Альшина², С.А. Еремин²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² ООО «СКТБ «Пластик»

The Selection of the Reinforcement Scheme for a Parabolic Antenna Made of Composite Materials with an Elliptical Aperture Line

A.L. Galinovsky¹, A.V. Denisov², E.A. Gavrilova², S.A. Gordeev²,
S.A. Alshina², S.A. Eremin²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² OOO SKTB Plastik

Рассмотрены вопросы проектирования и расчета подкрепленных оболочек вращения, выполненных из композиционных материалов, как составных элементов параболических антенн с эллиптической линией раскрыва, фокальный параметр которой не превышает 0,03 м. Дан обзор конструктивно-компоновочных схем рефлекторов зеркальных космических антенн параболического типа. Предложена методика проектирования силового каркаса подкрепления оболочки рефлектора с использованием численного анализа на базе метода конечных элементов, основанная на оценке жесткостных параметров конструктивных элементов рефлектора, расположенных между кольцевыми ребрами, с проведением оптимизации для достижения постоянства градиента изменения жесткостных параметров. Выполнена оценка деформативности конструкции рефлектора с применением современного высокомолекулярного композиционного материала. Приведен результат использования предложенной методики в виде готового изделия с оценкой погрешностей изготовления и моделирования на основе экспериментальных данных. Предложенный подход к проектированию рефлекторов с эллиптической линией раскрыва позволяет исключить коробление сформованного изделия и деформацию в процессе эксплуатации в виде закручивания в форме пропеллера. Результаты работы могут быть полезны при проектировании рефлекторов зеркальных антенн космических аппаратов с узкой диаграммой направленности, отвечающих высоким требованиям по точности геометрии отражающей поверхности и ограничениям по массе.

Ключевые слова: рефлектор зеркальной антенны, эллиптическая вырезка, узкая диаграмма направленности, композиционные материалы, расчетная модель рефлектора

The problems of designing and calculating reinforced shells of revolution made of composite materials as constituent elements of parabolic antennas with an elliptical aperture line having a focal parameter value of not more than 0.03 m are examined in this paper. The structural layout schemes of reflectors of the parabolic-type mirror spacecraft antennas are reviewed. A technique for designing a bearing frame for reinforcing the reflector shell using

numerical analysis based on the finite element method is presented. The technique is based on the assessment of the stiffness parameters of the structural elements of the reflector located between the annular ribs. It utilizes optimization in order to achieve a constant gradient of changes in the stiffness parameters. The deformability of the reflector design that uses a modern high-modulus composite material is evaluated. A finished product is presented as the result of the application of the technique. An assessment of manufacturing and design errors is performed based on the experimental data. The proposed approach to the design of reflectors with an elliptical aperture line eliminates warping of the molded product and deformation during operation such as twisting in the form of a propeller. The results of the study can be used for designing reflectors of spacecraft mirror antennas with a narrow radiation pattern that meet strict requirements of the accuracy of the reflecting surface geometry as well as mass restrictions.

Keywords: mirror antenna reflector, elliptical notch, narrow radiation pattern, composite materials

Среди антенн, применяемых в космической связи и радиоастрономии, наибольшее распространение получили зеркальные, классическими представителями которых служат параболические антенны в виде параболоида вращения.

Основными требованиями, предъявляемыми к зеркальной антенне, являются: жесткость и прочность конструкции в рабочем состоянии (в том числе на этапе ее вывода на орбиту в составе космического аппарата), малая масса, получение и сохранение при эксплуатации теоретической поверхности рефлектора с заданной (обычно высокой) степенью точности.

Любые случайные и периодические ошибки в изготовлении профиля рабочей поверхности рефлектора в совокупности приводят к уменьшению коэффициента усиления антенны. При этом важным вопросом является выбор материала конструкции с малыми коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР) и плотностью, высокими жесткостью и прочностью [1, 2].

В последние годы в антенных конструкциях широко применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе углеродных волокон и полимерных матриц (углепластики). Вследствие анизотропных свойств углеродных волокон КЛТР слоистого композита может быть близким к нулю в широком температурном диапазоне.

Это принципиально важно для космических конструкций в связи с их постоянно меняющимся и неравномерным солнечным нагревом. Высокая удельная прочность углеродных волокон позволяет создавать из них с помощью прогрессивных технологических методов формообразования достаточно жесткие панельные конструктивные элементы. Однако

из-за анизотропии физико-механических свойств возникают дополнительные сложности при проектировании как материала, так и конструкции.

В то же время благодаря анизотропии появляются достаточно широкие возможности управления свойствами изделия, т. е. можно оптимизировать рефлекторы зеркальных космических антенн (РЗКА) по массовым, жесткостным и геометрическим параметрам. Создание рационального варианта конструкции напрямую зависит от получения заданных термомеханических характеристик слоистых ПКМ. Изменяя тип волокна, матрицы, их соотношения и схему армирования, используя другие технологические возможности, можно изготовить формостабильные конструкции зеркальных антенн с заданными параметрами.

Недостатками конструкций из углепластиков, которые необходимо учитывать при проектировании, являются небольшая теплопроводность и хрупкость [3, 4].

Цель работы — анализ существующих конструктивно-компоновочных схем (ККС) РЗКА и выбор схемы подкрепления РЗКА параболического типа с отражающей поверхностью в виде эллиптической вырезки из параболоида вращения.

С началом применения ПКМ в конструкциях РЗКА параболического типа реализовано и исследовано несколько ККС [5–12]. К ним относятся:

- трехслойные параболические оболочки с сотовым наполнителем, в том числе с ферменными элементами для придания дополнительной жесткости конструкции РЗКА; примерами такой компоновки служат ККС, которые использованы на спутнике Ямал-401 (рис. 1, а),



а



б



в



з



д



е

Рис. 1. Варианты конструкций РЗКА:

а — трехслойные рефлекторы с ферменным усилением, установленные на спутник связи «Ямал-401» (АО «ИСС им. М.Ф. Решетнёва»); б — рефлектор антенны фирмы Vanguard Space Technologies, состоящий из сдвоенных оболочек, усиленных ребрами; в — опытный образец антенны с основной и поддерживающей оболочками («ИСС им. М.Ф. Решетнёва», СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва); з — центральная часть РЗКА космического радиотелескопа «Радиоастрон» (ОАО «Пластик»); д — экспериментальный РЗКА (МГТУ им. Н.Э. Баумана); е — РЗКА с ортогональным набором ребер подкрепления тонкой оболочки сложной геометрии (ООО «СКТБ «Пластик»)

разработанном АО «ИСС им. М.Ф. Решетнёва» совместно с компанией Thales Alien Space (Франция-Италия) и АО «Газпром космические системы»;

- ККС со сдвоенными оболочками, усиленными ребрами; вариант такой антенны фирмы

Vanguard Space Technologies (США) приведен на рис. 1, б;

- ККС с несколькими сопряженными углепластиковыми оболочками; в «ИСС им. М.Ф. Решетнёва» совместно с СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва создан и испы-

тан опытный образец рефлектора антенны, состоящего из фронтальной (отражающей) оболочки и поддерживающей ее тыльной оболочки (рис. 1, в);

- подкрепленные тонкостенные конструкции, представляющие собой систему из совместно отформованных и связанных без использования дополнительных механических элементов (заклепок, винтов и т. д.) оболочек и тонкостенных профилей — кольцевых и радиальных ребер; центральная часть уникального рефлектора антенны космического радиотелескопа «Радиоастрон» производства ОАО «Пластик», запущенного в 2010 г., представляет собой осесимметричную параболическую оболочку с радиально-кольцевым силовым каркасом (рис. 1, з);

- подкрепленная тонкая гладкая оболочка с системой ребер, выполненных по изогридной схеме; В МГТУ им. Н.Э. Баумана спроектирован и изготовлен экспериментальный РЗКА с такой ККС (рис. 1, д);

- подкрепленная тонкая оболочка сложной геометрии, искривленная в двух направлениях, с набором ребер, расположенных ортогональным образом и совпадающих по направлению со структурой армирования слоев композита оболочки; в максимально нагруженных местах использованы ребра двутаврового типа (рис. 1, е); РЗКА спроектирован в ООО «СКТБ «Пластик».

В настоящей статье изложен подход к проектированию рефлекторов размеростабильных зеркальных антенн параболического типа с эллиптической линией раскрыва. Рассмотрено одно из решений задачи проектирования РЗКА, представляющих собой тонкостенные подкрепленные конструкции из композиционного материала с симметричной структурой по толщине пакета.

За критерий проектирования принята стабильность геометрической формы. Из многообразия внешних факторов, влияющих на формостабильность и размерную устойчивость, выделено температурное поле. Проанализировано динамическое поведение конструкции в части собственных частот и форм колебаний.

Аспекты технологии изготовления РЗКА в виде подкрепленных оболочек вращения. При создании конструкций из ПКМ вопросы проектирования, оптимального армирования и разработки технологического процесса явля-

ются тремя нераздельными сторонами одной проблемы.

Для повышения ресурса, живучести и остаточной прочности размеростабильных конструкций используют концепцию создания конструкций интегрального типа. В основу современной технологии изготовления интегральной конструкции из ПКМ положен принцип совмещенного по времени формования всех ее элементов. Наиболее полно интегральность выражена в рефлекторах размеростабильных космических антенн, особенно, когда все элементы должны быть выполнены из одного материала — углепластика, обладающего низким КЛТР.

Основной особенностью такого способа изготовления является применение термокомпрессионного метода в комбинации с автоклавным формованием изделия из ПКМ. Принцип комбинации заключается в том, что формование пакета препрегов во взаимно перпендикулярных плоскостях осуществляется избыточным давлением в автоклаве и упругой деформацией терморасширяющихся оправок, помещенных во внутренних полостях изделия [13, 14].

В процессе формования изделия из ПКМ при повышенной температуре (для проведения процесса отверждения) в элементах конструкции при наличии разноориентированных или разнородных слоев волокнистых композитов образуются технологические остаточные напряжения и деформации, вызванные особенностями их механических и теплофизических свойств (анизотропией), неоднородностью структуры (волокон и матрицы), уровнем предварительного натяжения волокон, углами разориентации при выкладке препрега, использованием различных материалов в слоях, наличием металлических закладных элементов, взаимодействием с технологической оснасткой, определяющей геометрическую точность.

Анализ коробления с помощью методов нелинейной геометрической теории показывает, что в зависимости от свойств слоев и их укладки изгиб слоистых структур может происходить как по поверхности двойной кривизны, так и по цилиндрической поверхности [15, 16].

Построение наиболее полных и достаточно эффективных математических моделей материала и элементов конструкции, а также соответствующих методов их решения является основной проблемой при создании размеростабиль-

ных композитных конструкций. Введение ребер жесткости может привести к сильной неоднородности напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и ухудшить условия ее работы, например, вследствие значительных напряжений в силовом каркасе.

При выборе структуры стрингерного набора и схем армирования конструкции из ПКМ с конструктивной анизотропией (в том числе с эксцентричными дискретными подкреплениями) следует учитывать вероятность появления коробления изготавливаемых изделий в процессе температурного формования в виде деформаций изгиба и закручивания.

В частности, при проектировании подкрепленных оболочек вращения из ПКМ (как составных элементов параболических антенн с радиально-кольцевым силовым каркасом) надо учитывать расположение радиальных ребер их подкрепления при задании углов укладки углеленты секторами в процессе выкладки тонкостенной оболочки.

Укладка углеленты секторами ввиду необходимости углового смещения секторов при каждом последующем слое приводит к появлению волнообразного характера деформаций оболочки вращения и к несимметрии деформаций относительно координатных осей при воздействии повышенной температуры в процессе формования. Максимальная амплитуда краевой волны незначительна, но для рефлекторов с повышенным требованием к точности изготовления она может внести весомые погрешности в геометрию готового изделия с конструктивной анизотропией.

Выбор материалов. В соответствии с задачами проектирования конструкции исследованы термомеханические характеристики различных пакетов углепластиков на основе непрерывных волокон, обладающих уникальным набором физико-механических свойств и технологическими возможностями для их реализации в изделиях, с разными схемами армирования.

Рассмотрены углепластики на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 (ГОСТ 28006–88) и углеродного плетенного жгута М55J. Углеволкна серии М (М35, М40, М46, М50, М55, М60), производимые одним из лидеров в этой области — фирмой Toray [17], значительно превосходят традиционно применяемые в отечественной промышленности углепластики по потенциальным возможностям при требовании

максимальной жесткости и умеренных показателей прочности. Требования такого рода важны при проектировании конструкций РЗКА, на которые действуют сравнительно небольшие нагрузки, поэтому их качество определяется не прочностью, а жесткостью.

В качестве полимерных матриц выбраны эпоксидные и цианат-эфирные связующие. Армированные пластики, как правило, содержат большое количество наполнителя, который образует жесткий скелет, препятствующий деформации полимера, т. е. связующее подвергается всестороннему растяжению. При этом объемная деформация может составлять несколько процентов.

Таким образом, уже в ненагруженном состоянии полимерная матрица должна выдерживать значительные механические деформации без разрушения и нарушения адгезии на границе с волокном. Эпоксидные смолы, обладающие высокими адгезионными свойствами и прочностными характеристиками, значительно лучше большинства связующих выдерживают подобные условия.

К преимуществам эпоксидных смол перед другими связующими относятся: высокие прочностные характеристики в широком температурном интервале, водо- и химическая стойкость.

Цианат-эфирные связующие — это уникальные химические соединения, мономерные звенья которых имеют высокую жесткость, а при отверждении образуют полимерные сетки с повышенным свободным объемом. Пластик, полученный на основе цианат-эфирных связующих, обладает высокой термостойкостью, низкими газо-, влагопоглощаемостью и газовыделением, высокими диэлектрическими свойствами, хорошей сопротивляемостью к ионизирующему излучению и радиопрозрачностью, что с учетом размеростабильных свойств делает цианат-эфирные связующие лучшим материалом для применения в космическом аппаратостроении [18].

В качестве ПКМ при проектировании и проведении параметрического анализа конструкции РЗКА рассмотрены:

- углепластик КМУ-4Л на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 (ГОСТ 28006–88) и связующего ЭНФБ (ТУ 1-596-36–2005);
- высокомодульный углепластик на основе препрега М55J/НИИКАМ-РС производства ООО «НИИКАМ» с армирующим наполните-

Таблица 1

Физико-механические характеристики однонаправленных углепластиков, принятые для расчета

Характеристика	Углепластик	
	КМУ-4Л	Высокомодульный
Модуль упругости при растяжении, ГПа: по основе E_{11+} по утку E_{22+}	137	299
	5	7
Модуль сдвига G_{12} , ГПа	5	6
Коэффициент Пуассона μ_{12}	0,251	0,350
Предел прочности при растяжении, МПа	800	1395
КЛТР, K^{-1} по основе $\alpha_1 \cdot 10^6$ по утку $\alpha_2 \cdot 10^6$	-0,290	-0,798
	27,16	29,80
Толщина ткани (монослоя) δ , мм	0,135	0,100
Плотность материала ρ , $кг/м^3$	1500	1588

лем в виде плоского углеродного жгута и цианат-эфирного связующего.

Принятые для расчета экспериментальные физико-механические характеристики однонаправленных углепластиков, сформованных и испытанных в ООО «СКТБ «Пластик», приведены в табл. 1.

Описание конструкции РЗКА. В качестве конструкции РЗКА рассмотрено антенное зеркало из углепластика, представляющее собой тонкостенную оболочку толщиной 1,2 мм, подкрепленную с тыльной стороны ребрами жесткости. Поверхность зеркала — эллиптическая вырезка из параболоида вращения, фокальный параметр эллиптической линии раскрыва рефлектора не превышает 0,03 м. Габаритные размеры (длина \times ширина) РЗКА: 1,4 \times 0,25 м. На рис. 2 приведен вид рабочей поверхности РЗКА.

Для проектирования конструкции зеркальной антенны предложено решение, использующее численный анализ на базе метода конечных



Рис. 2. Вид рабочей поверхности РЗКА

элементов (МКЭ), с применением программы инженерного анализа Nastran [19–21]. Расчеты выполнены с учетом упругих деформаций.

В качестве расчетной модели конструкции рефлектора с эксцентричным дискретным подкреплением рассмотрена схематизация изучаемой пространственной тонкостенной системы в виде конструктивно-анизотропной модели. Дискретизация расчетной модели проведена оболочечными (двумерными) конечными элементами с линейными функциями формы. Граничные условия — ограничения перемещений в местах крепления рефлектора.

Выбор силового каркаса подкрепления оболочки рефлектора. Основной задачей при выборе конструкции силового каркаса является создание рационального варианта подкрепленной конструкции рефлектора, зависящего непосредственно от жесткостных и термомеханических характеристик оболочки и каркаса ребер, и управления с их помощью законом деформирования элементов зеркала.

На первом этапе разработана схема силового каркаса подкрепления тонкой оболочки. Рассмотрено несколько вариантов конструкций системы подкрепления РЗКА, оценен вклад окружных и косых (диагональных) ребер. На рис. 3 приведены конечно-элементные модели (КЭМ) четырех вариантов анализируемого силового каркаса подкрепления оболочки. Силовые каркасы смоделированы одномерными (балочными) конечными элементами

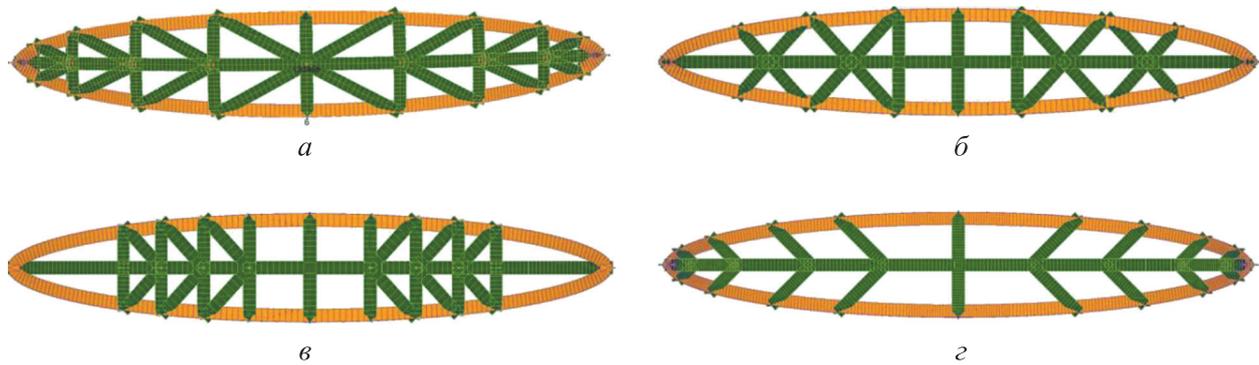


Рис. 3. КЭМ первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (з) вариантов силового каркаса РЗКА

с использованием программы инженерного анализа Nastran.

Принимая во внимание технологию температурного формования и влияние остаточных напряжений, исследовано поведение конструкций силовых каркасов на изгибающую и крутильную нагрузки. В процессе анализа вариантов силового каркаса требовалось исключить волнообразный характер изменения градиента поля деформаций и углов поворота при воздействии температурных и силовых нагрузок. В то же время рассматривалась задача минимизация массы.

Для уточнения вариантов конструктивных схем силового каркаса в плане расположения ребер выполнена оптимизация РЗКА по жесткости при растяжении/сжатии и изгибе. Жесткостные параметры рассчитаны отдельно по каждому из участков систем подкрепления ребер (между окружными ребрами) в совокупности с оболочкой рефлектора. При этом жесткостные и инерционные свойства подкрепляющих элементов «размазывались» по поверхности оболочки.

Контроль деформаций проведен с применением МКЭ при воздействии боковой силы и крутящего момента, приложенных к узлу, расположенному на периферии центрального продольного (радиального) ребра. Боковая сила эквивалентна рабочему ускорению, действующему на зеркальную антенну во время эксплуатации.

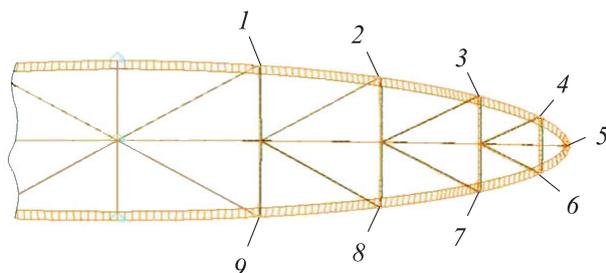


Рис. 4. КЭМ первого варианта силового каркаса: 1–9 — номера контролируемых узлов

Для контроля деформаций выбраны девять характерных узлов на окантовочном ребре, расположение которых показано на КЭМ первого варианта силового каркаса (рис. 4).

По результатам расчета НДС построены поля деформаций КЭМ для четырех вариантов силового каркаса, выполненного из углепластика КМУ-4Л (рис. 5).

Графики суммарных (полных) деформаций и углов поворота контрольных узлов при воздействии боковой силы F_x приведены на рис. 6, а и б соответственно, графики полных деформаций контрольных узлов при воздействии изгибающего момента M_y — на рис. 6, в.

Сравнительный анализ конструкций силовых каркасов с равными массовыми характеристиками показал, что независимо от упругих свойств углепластиков:

- для исключения волнового характера деформаций окантовочного ребра необходимо наличие как кольцевых (поперечных), так и косых ребер;
- отсутствие кольцевых или косых ребер увеличивает деформативность конструкции до 70 %.

При этом полные деформации конструкций силовых каркасов, выполненных из высокомодульного углепластика, на 50 % меньше, чем у таковых из углепластика КМУ-4Л.

С учетом технологичности изготовления и оценки деформации каркасов по критерию минимизации массы и равномерного изменения градиента деформаций окантовочного ребра выбрана принципиальная схема первого варианта силового каркаса подкрепления оболочки, содержащая центральное радиальное ребро, кольцевые и диагональные ребра.

На втором этапе проведен параметрический анализ КЭМ РЗКА, смоделированной

двумерными конечными элементами, с первым вариантом силового каркаса подкрепления оболочки при варьировании высот (60...30 мм) и толщин (6,60...2,28 мм) ребер. Оценка де-

формаций рефлектора выполнена по результатам температурных деформаций при температурном воздействии $\Delta T = -155^\circ\text{C}$ в процессе формирования в обезвешенном состоянии.

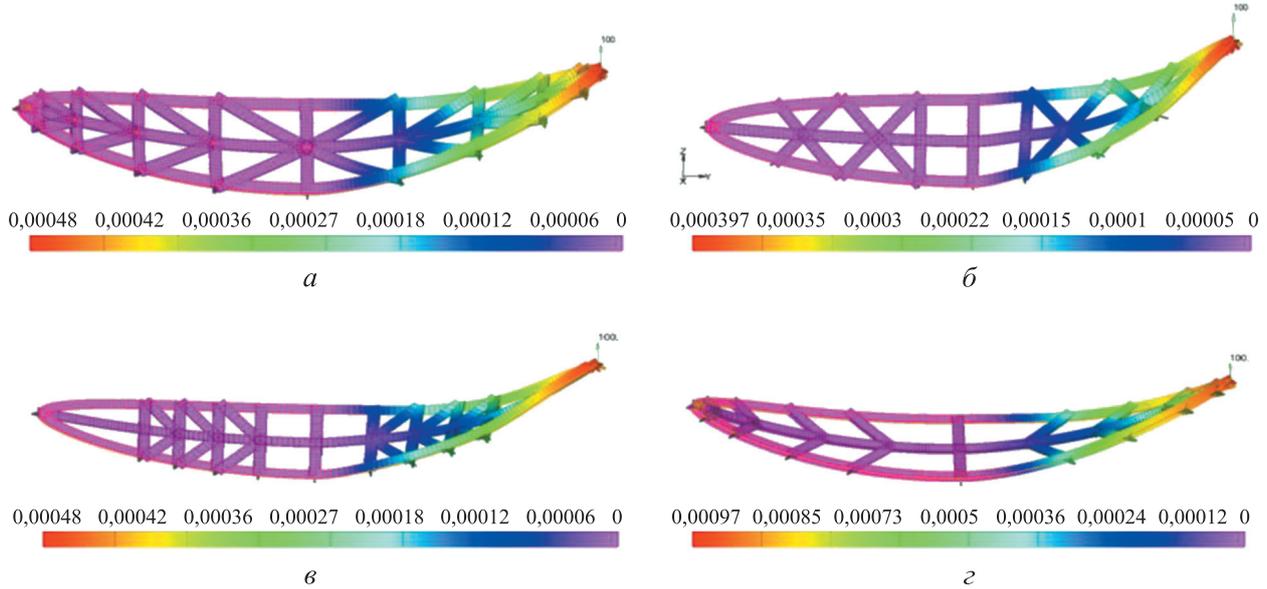


Рис. 5. Поля деформаций, м, КЭМ первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) вариантов силового каркаса, выполненного из углепластика КМУ-4Л, при воздействии боковой силы $F_x = 100\text{ Н}$

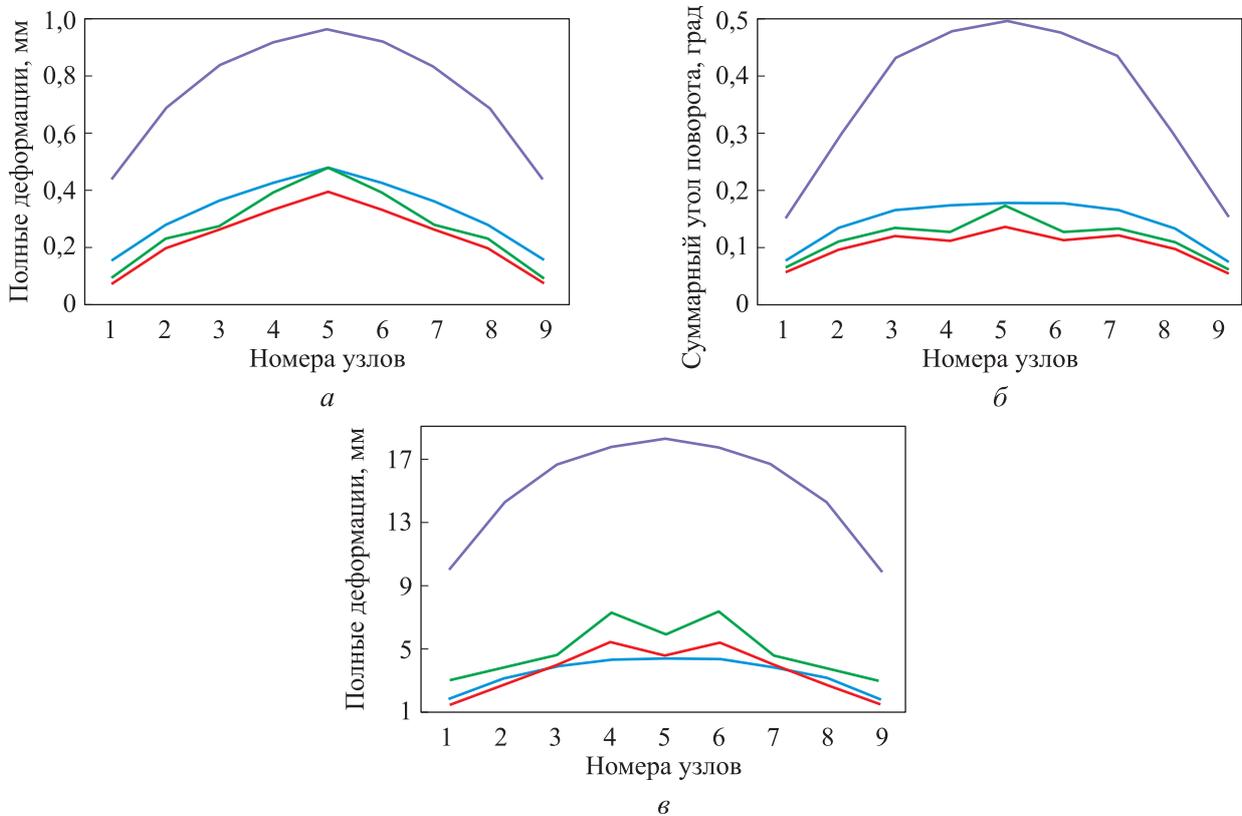


Рис. 6. Графики параметров КЭМ первого (—), второго (—), третьего (—) и четвертого (—) вариантов силового каркаса, выполненного из углепластика КМУ-4Л:
а и б — полных деформаций и углов поворота контрольных узлов при воздействии боковой силы F_x соответственно;
в — полных деформаций контрольных узлов при воздействии изгибающего момента M_y

По критериям деформативности, масс и относительных деформаций оболочки выбраны следующие параметры силового каркаса:

- высота ребер — 30 мм;
- толщина ребер — 2,28...2,52 мм.

Выбор схемы армирования для оболочки РЗКА. Исходя из конструкции силового каркаса выбрана квазиизотропная укладка слоев композита для оболочки. Исследованы термоупругие характеристики различных пакетов углепластиков для схемы армирования $(0^\circ/\pm\theta^\circ/90^\circ)_n$, где θ — угол укладки; n — количество пакетов с данной укладкой слоев в композите. В силовом каркасе углы между ребрами составляют $17...73^\circ$, поэтому углы θ варьировали в пределах $20...70^\circ$. Расчетные физико-механические характеристики углепластиков приведены в табл. 2.

В качестве основного варианта армирования композита выбрана квазиизотропная структура $(0/\pm 45^\circ/90^\circ)_n$, которая технологична и позволяет удовлетворять требованиям по осевой и сдвиговой жесткости.

Численный анализ НДС РЗКА. Рассмотрен вариант закрепления РЗКА на ответной части по восьми втулкам, расположенным в центре силового каркаса на пересечении ребер. В местах крепления в конструкцию РЗКА введены втулки из титана ВТ14 (ГОСТ 19807–91).

На рис. 7 приведены трехмерная модель и КЭМ уточненной конструкции РЗКА, выполненная с использованием двумерных конечных элементов с линейной аппроксимирующей функцией.

Таблица 2

Расчетные физико-механические характеристики углепластиков

Угол укладки θ , град	Модуль упругости, ГПа		Модуль сдвига G_{xy} , ГПа	КЛТР, K^{-1}	
	E_x	E_y		$\alpha_x \cdot 10^6$	$\alpha_y \cdot 10^6$
20	89,07/188,60	39,04/80,17	11,10/20,04	0,19/0,20	2,72/0,08
30	72,94/152,51	41,35/84,38	16,16/31,59	0,31/0,31	2,14/0,17
40	57,50/118,29	46,90/95,56	19,47/39,12	0,70/0,34	1,39/0,27
45	51,48/105,28	51,48/105,28	19,92/40,15	1,02/0,31	1,02/0,31
50	46,90/95,56	57,50/118,29	19,47/39,12	1,39/0,27	0,70/0,34
60	41,35/84,38	72,94/152,51	16,16/31,59	2,14/0,17	0,31/0,31
70	39,04/80,17	89,07/188,60	11,10/20,04	2,72/0,08	0,19/0,20

Примечание. В числителе дроби указаны значения для углепластика КМУ-4Л, в знаменателе — для высокомодульного углепластика.

При разработке технологической оснастки для формования РЗКА выполнена оценка влияния закрепления на ней зеркала в процессе формования при температуре $175^\circ C$. Оснастка для формования изготовлена из стали 20 (ГОСТ 1050–88) с учетом температурного упреждения. В местах фиксации закладных элементов на оснастке введена температурная развязка для исключения возникновения дополнительных остаточных температурных деформаций и напряжений в элементах конструкции рефлектора.

Расчет НДС с оценкой размеростабильности конструкции проведен при совместном воздействии следующих эксплуатационных нагрузок:

- линейных ускорений $3,5 g$ в направлении фокальной оси рефлектора;
- температурной нагрузки, равной $-55^\circ C$.

По результатам расчета НДС получены значения максимальных деформаций (полных W_Σ и по осям x, y, z W_x, W_y, W_z соответственно) узлов КЭМ РЗКА при совместном воздействии линейных ускорений и температурных нагрузок, приведенные в табл. 3, где СКО — среднеквадратическое отклонение. При применении высокомодульного материала на основе препрега М55J/НИИКАМ-РС деформации конструкции уменьшаются в среднем на 55 %.

На рис. 8 показано поле полных деформаций РЗКА, выполненного из углепластика КМУ-4Л, при совместном воздействии линейных ускорений и температурных нагрузок на фоне недеформированного состояния.

Одно из главных требований, предъявляемых к разрабатываемому РЗКА, — снижение масса конструкции. Уменьшение массы ре-

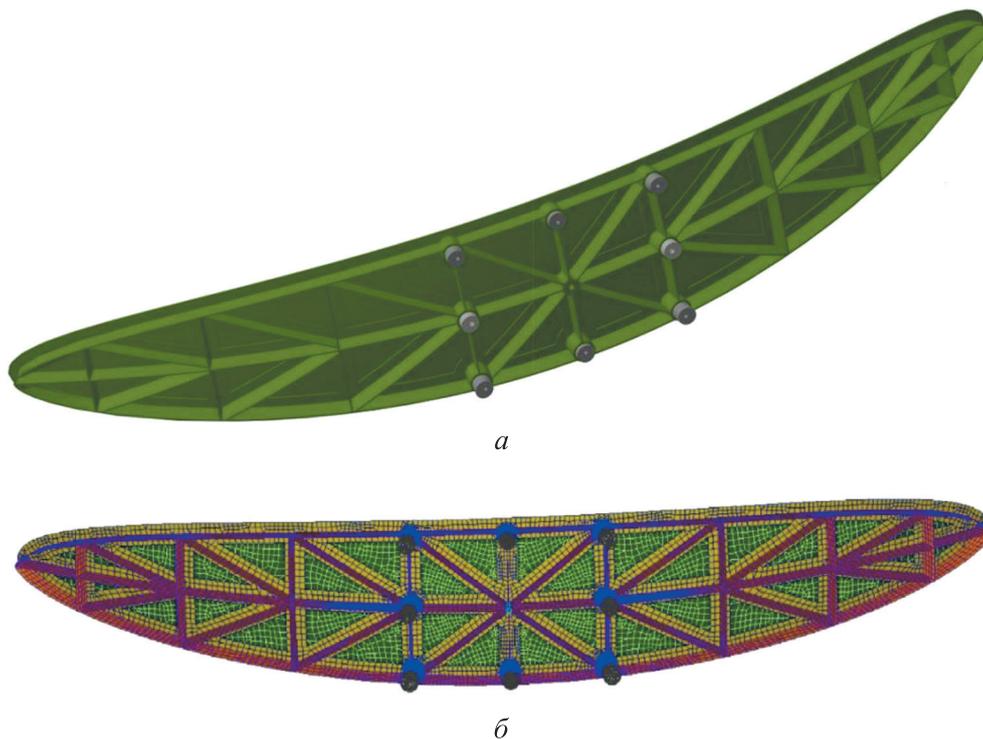


Рис. 7. Трехмерная модель (а) и КЭМ (б) уточненной конструкции РЗКА

Таблица 3

Значения максимальных деформаций узлов КЭМ РЗКА при совместном воздействии линейных ускорений и температурных нагрузок

Углепластик	Максимальные деформации, мм				СКО
	W_{Σ}	W_x	W_y	W_z	
КМУ-4Л	0,610	$\pm 0,023$	$\pm 0,360$	$-0,04 \dots 0,50$	0,220
Высокомодульный	0,138	$\pm 0,009$	$\pm 0,077$	$-0,03 \dots 0,12$	0,047

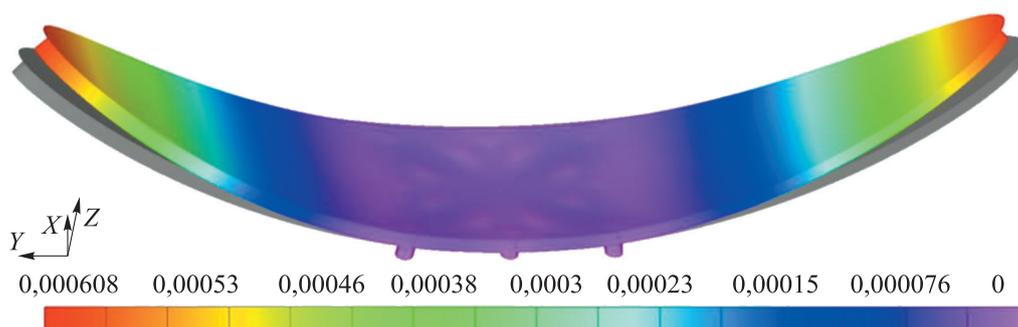


Рис. 8. Поле полных деформаций, м, РЗКА, выполненного из углепластика КМУ-4Л, при совместном воздействии линейных ускорений и температурных нагрузок на фоне недеформированного состояния

флектора, выполненного из высокомодульного материала, по сравнению с таковой из углепластика КМУ-4Л достигает 22 %.

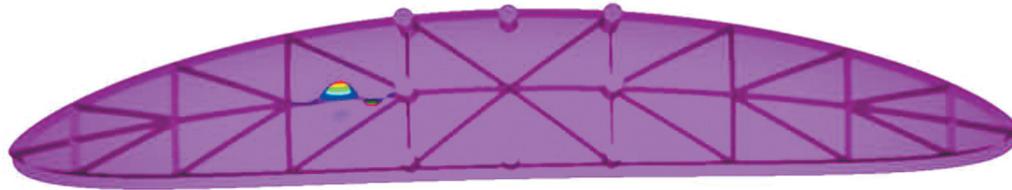
Для подкрепленной оболочки возможны два варианта разрушения: потеря устойчивости ее части, заключенной между подкрепляющим

набором (местная потеря устойчивости), и потеря устойчивости оболочки с одновременным разрушением подкрепляющего ребра (общая потеря устойчивости). При рассмотренных эксплуатационных нагрузках происходит общая потеря устойчивости конструкции РЗКА в

центрального радиального ребре подкрепления. На рис. 9, а приведена первая форма потери устойчивости конструкции РЗКА, выполненного из углепластика КМУ-4Л.

Для определения упругомассовых свойств конструкции РЗКА проведен анализ собственных колебаний модели. Собственные частоты

колебаний f_1 конструкции превышают 70 Гц независимо от ПКМ ($f_1 = 75,8$ Гц для КМУ-4Л; $f_1 = 114,2$ Гц для высокомодульного углепластика). При применении высокомодульного материала первая собственная частота увеличивается в 1,5 раза. На рис. 9, б приведена первая собственная форма колебаний конструк-



Output Set: Eigenvalue 1 8.428003
Deformed(0.0168): Total Translation
Contour: Total Translation

а



Output Set: Mode 1. 75.79001 Hz
Deformed(0.0168): Total Translation
Contour: Total Translation

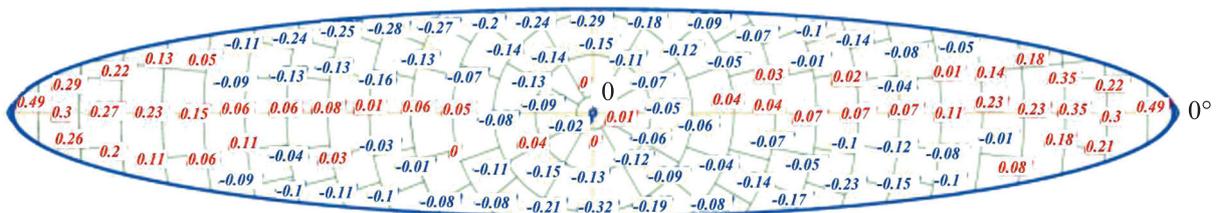
б

Рис. 9. Первые форма потери устойчивости (а) и собственная форма колебаний (б) конструкции РЗКА, выполненного из углепластика КМУ-4Л



а

90°



б

Рис. 10. Фрагмент сформованного РЗКА из углепластика КМУ-4Л (а) и поле отклонений рабочей поверхности РЗКА от теоретического профиля на схеме замеров, СКО = 0,15 мм (б)

ции РЗКА, выполненного из углепластика КМУ-4Л.

Оценка погрешности моделирования. К рабочей поверхности РЗКА предъявлено следующее требование: СКО профиля рефлектора должно быть не более 0,3 мм. На технологической оснастке с учетом температурного упреждения получено изделие из углепластика КМУ-4Л с максимальными отклонениями рабочей поверхности от теоретической в пределах 0,5 мм и СКО, равным 0,15 мм.

Масса углепластиковой части рефлектора не превышает 2,5 кг. Для создания радиоотражающего покрытия методом магнетронного напыления на рабочую поверхность зеркала было нанесено двухслойное покрытие, состоящее из слоев алюминия и стали (для защиты от коррозии), толщиной 3...5 мкм.

На рис. 10, а приведен фрагмент сформованного РЗКА из углепластика КМУ-4Л, на рис. 10, б — поле отклонений рабочей поверхности РЗКА от теоретического профиля на схеме замеров, СКО = 0,15 мм. Красным цветом выделены величины отклонений, превышающие соответствующие значения контрольных точек на рабочей поверхности рефлектора в направлении фокальной оси.

Погрешность моделирования конструкции с применением МКЭ в сравнении с экспериментальными данными составила около 12 %. Погрешность связана как с технологией формования, отклонениями углов при укладке слоев, с различным натяжением слоев в оболочке и в ребрах системы подкрепления, с наличием металлических закладных элементов и т. д., так и с погрешностью МКЭ.

Выводы

1. Предложенный подход к проектированию односторонне подкрепленной размеростабильной конструкции зеркальной антенны параболического типа из ПКМ, учитывающий конструктивную анизотропию, позволяет обеспечить достаточную жесткость и прочность в условиях эксплуатации при минимальной массе.

2. Выбранная схема подкрепления тонкостенной оболочки РЗКА с рабочей поверхностью в виде эллиптической вырезки из параболоида вращения с фокальным параметром эллиптической линии раскрыва рефлектора (не превышающей 0,03 м), состоящая из центрального радиального ребра, кольцевых и диагональных ребер, исключает возможность появления коробления рефлектора при формовании изделия и возникновения деформаций в процессе эксплуатации в виде закручивания в форме пропеллера.

3. Среднеквадратическое отклонение рабочей поверхности сформованного изделия из углепластика КМУ-4Л от теоретического профиля составило 0,15 мм при заданном требовании 0,3 мм. Относительные (к габаритным размерам) расчетные деформации конструкции зеркала не превышают $1,1 \cdot 10^{-4}$.

4. Собственные частоты колебаний конструкции зеркала больше 70 Гц независимо от материала углепластика.

5. При применении высокомодульного материала деформации конструкции зеркала уменьшаются на 55 %, первая собственная частота увеличивается в 1,5 раза, а масса углепластиковой части РЗКА снижается на 22 %.

6. По основным критериям (деформативности и массе) конструкции РЗКА из препрега М55/НИИКАМ-РС более предпочтительны, но их себестоимость значительно выше, чем у РЗКА из углеленты ЛУ-П/0,1. Кроме того, в заданных режимах работы конструкция рефлектора из углепластика КМУ-4Л удовлетворяет предъявляемым требованиям. Применение высокомодульного материала с большей стоимостью оправдано при предъявлении к РЗКА повышенных требований по жесткости с наименьшей массой.

7. Погрешность моделирования конструкции с помощью МКЭ в сравнении с экспериментальными данными составила около 12 %. Эта погрешность объясняется влиянием конструктивно-технологических факторов изготовления и наличием металлических закладных элементов.

Литература

- [1] Бахрах Л.Д., Галимов Г.К. *Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета*. Москва, Наука, 1981. 293 с.
- [2] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. *Space Antenna Handbook*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd., 2012. 741 p.

- [3] Алфутов Н.А. *Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1984. 264 с.
- [4] Васильев В.В. *Механика конструкций из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 1988. 272 с.
- [5] *Спутник связи ЯМАЛ-401*. URL: <http://www.iss-reshetnev.ru/projects> (дата обращения 18 марта 2020).
- [6] *Designing for dimensional stability in space*. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/designing-for-dimensional-stability-in-space> (accessed 18 March 2020).
- [7] Тайгин В.Б., Лопатин А.В. Разработка зеркальной антенны космического аппарата с ультралегким высокоточным размеростабильным рефлектором. *Космические аппараты и технологии*, 2019, № 3(29), с. 121–131, doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-121-131
- [8] Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф., Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Денисов А.В., Владимиров М.А. *Размеростабильное интегральное изделие из композиционных материалов, способ его изготовления и форма для осуществления способа*. Пат. 2230406 С2 РФ, 2001.
- [9] Новиков А.Д., Просунцов П.В., Резник С.В. Определение конструктивного облика рефлектора зеркальной космической антенны из композиционного материала. *Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования*, 2017, т. 18, № 3, с. 308–317, doi: 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317
- [10] Бабкина Л.А., Сорокин Д.В. Параметрический анализ параболической антенны космического аппарата с многовариантной схемой подкрепления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4, doi: 10.18698/2308-6033-2017-4-1611
- [11] Савин С.А., Биткин В.Е., Денисов А.В., Каштанов П.П., Гаврилова Е.А., Савельева Е.В., Назаров Е.В., Ермохин М.А., Еремин С.А. *Конструкция рефлектора зеркала антенного из полимерных композиционных материалов*. Пат. 2640955 РФ, 2018, бюл. № 2, 8 с.
- [12] Бердникова Н.А., Иванов А.В., Белов О.А., Чичурин В.Е. Проектирование крупнобаритного высокоточного рефлектора антенны космического аппарата с контурной диаграммой направленности. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 2, с. 378–387.
- [13] Биткина Е.В., Денисов А.В., Биткин В.Е. Конструктивно-технологические методы создания размеростабильных космических композитных конструкций интегрального типа. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, т. 14, № 4(2), с. 555–560.
- [14] Биткин В.Е., Денисов А.В., Денисова М.А., Жидкова О.Г., Назаров Е.В., Рогальская О.И., Мелентьев А.В., Мизинова И.А. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2014, т. 16, № 1–5, с. 1320–1327.
- [15] Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. *Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов*. Москва, Машиностроение, 2000. 352 с.
- [16] Михайловский К.В., Резник С.В. Разработка математико-алгоритмического обеспечения для расчета внутренних напряжений в тонкостенных рефлекторах из углепластика во время технологического процесса их изготовления. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 8, с. 151–166, doi: 10.7463/0813.0612095
- [17] *Torayca Everywhere*. URL: https://www.torayca.com/activity/act_005.html (дата обращения 15 марта 2020).
- [18] Аристов В.Ф., Халиманович В.И., Миронович В.В., Ислентьева Т.А., Гуров Д.А. Цианат-эфирные связующие в аэрокосмической отрасли. Каталитические свойства органометаллических комплексов и солей диазония с комплексными анионами в отверждении цианат-эфирных связующих. *Вестник СибГАУ*, 2013, № 2(48), с. 159–165.
- [19] Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва, Мир, 1975. 540 с.
- [20] Шимкович Д.Г. *Расчет конструкций в MSC.vsuat NASTRAN for Windows*. Москва, ДМК Пресс, 2004. 700 с.
- [21] *Nastran MSC.Quick reference guide*. USA, MSC Software Corporation, 2011.

References

- [1] Bakhrahk L.D., Galimov G.K. *Zerkal'nyye skaniruyushchiye anteny. Teoriya i metody rascheta* [Mirror Scanning Antennas. Theory and calculation methods]. Moscow, Nauka publ., 1981. 293 p.
- [2] Imbriale W.A., Gao S., Boccia L. *Space Antenna Handbook*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd., 2012. 741 p.
- [3] Alfutov N.A. *Raschet mnogosloynnykh plastin i obolochek iz kompozitsionnykh materialov* [Calculation of multilayer plates and shells made of composite materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1984. 264 p.
- [4] Vasil'yev V.V. *Mekhanika konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures made of composite materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1988. 272 p.
- [5] *Sputnik svyazi YAMAL-401* [YAMAL-401 communications satellite]. Available at: <http://www.iss-reshetnev.ru/projects> (accessed 18 March 2020).
- [6] *Designing for dimensional stability in space*. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/designing-for-dimensional-stability-in-space> (accessed 18 March 2020).
- [7] Taygin V.B., Lopatin A.V. Design of the mirror antenna of a spacecraft with the ultralight high precision size-stable reflector. *Spacecrafts & Technologies*, 2019, no. 3(29), pp. 121–131 (in Russ.), doi: 10.26732/2618-7957-2019-3-121-131
- [8] Simonov V.F., Urmansov F.F., Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Denisov A.V., Vladimirova M.A. *Razmerostabil'noye integral'noye izdeliye iz kompozitsionnykh materialov, sposob ego izgotovleniya i forma dlya osushchestvleniya sposoba* [Size-stable integral product made of composite materials, method for its manufacture and form for implementing the method]. Patent RU no. 2230406 C2, 2001.
- [9] Novikov A.D., Prosuntsov P.V., Reznik S.V. Mirror space antenna reflector made of composite materials constructive appearance determination. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernyye issledovaniya*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 308–317 (in Russ.), doi 10.22363/2312-8143-2017-18-3-308-317
- [10] Babkina L.A., Sorokin D.V. Parametric analysis of the spacecraft parabolic antenna with a multivariate reinforcement scheme. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 4 (in Russ.), doi: 10.18698/2308-6033-2017-4-1611
- [11] Savin S.A., Bitkin V.E., Denisov A.V., Kashtanov P.P., Gavrilova E.A., Savel'yeva E.V., Nazarov E.V., Ermokhin M.A., Eremin S.A. *Konstruksiya reflektora zerkala antennogo iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Antenna mirror reflector design made of polymer composite materials]. Patent no. 2640955 RF, 2018, 8 p.
- [12] Berdnikova N.A., Ivanov A.V., Belov O.A., Chichurin V.E. Design of the large-size high-precision reflector of the spacecraft antenna with the planimetric directional diagram. *Vestnik SibGAU*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 378–387 (in Russ.).
- [13] Bitkina E.V., Denisov A.V., Bitkin V.E. Design-engineering methods of creating of dimensionally stable space structures of integrated type made of composite materials. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4(2), pp. 555–560 (in Russ.).
- [14] Bitkin V.E., Denisov A.V., Denisova M.A., Zhidkova O.G., Nazarov E.V., Rogal'skaya O.I., Melent'yev A.V., Mizinova I.A. Approbation of the technological complex of production the power and high-precision size-stable integrated type construction elements from fibrous composite materials. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 1-5, pp. 1320–1327 (in Russ.).
- [15] Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Simonov V.F., Urmansov F.F. *Formostabil'nyye i intellektual'nyye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Shaped and intelligent composite structures]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2000. 352 p.
- [16] Mikhaylovskiy K.V., Reznik S.V. Development of mathematical and algorithmic support for determination of internal stresses in thin reflectors made of carbon-epoxy composite during the technological process of manufacturing. *Science and Education of BMSTU*, 2013, no. 8, pp. 151–166 (in Russ.), doi: 10.7463/0813.0612095
- [17] *Torayca Everywhere*. Available at: https://www.torayca.com/activity/act_005.html (accessed 15 March 2020).

- [18] Aristov V.F., Khalimanovich V.I., Mironovich V.V., Islent'yeva T.A., Gurov D.A. Cyanate ester coupling agents in aerospace industry. Catalytic properties of organometallic complexes and diazonium salts with complex anions in the curing reaction of cyanate ester coupling agents. *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), pp. 159–165 (in Russ.).
- [19] Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, McGraw-Hill, 1971. 521 p. (Russ. ed.: Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. Moscow, Mir publ., 1975. 540 p.).
- [20] Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC.vsuat NASTRAN for Windows* [Structural Analysis in MSC.vsuat NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press, 2004. 700 p.
- [21] *Nastran MSC.Quick reference guide*. USA, MSC Software Corporation, 2011.

Статья поступила в редакцию 01.04.2020

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

ДЕНИСОВ Александр Владимирович — начальник отдела. ООО «СКТБ «Пластик» (446025, Сызрань, Российская Федерация, Самарская обл., Саратовское шоссе, д. 4, e-mail: opriokr@sktb-plastik.ru).

ГАВРИЛОВА Елена Анатольевна — ведущий инженер по расчетам на прочность. ООО «СКТБ «Пластик» (446025, Сызрань, Российская Федерация, Самарская обл., Саратовское шоссе, д. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

ГОРДЕЕВ Сергей Александрович — ведущий инженер-конструктор. ООО «СКТБ «Пластик» (446025, Сызрань, Российская Федерация, Самарская обл., Саратовское шоссе, д. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

АЛЬШИНА Светлана Алексеевна — инженер-технолог первой категории. ООО «СКТБ «Пластик» (446025, Сызрань, Российская Федерация, Самарская обл., Саратовское шоссе, д. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

ЕРЕМИН Сергей Александрович — руководитель проектов. ООО «СКТБ «Пластик» (446025, Сызрань, Российская Федерация, Самарская обл., Саратовское шоссе, д. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

Information about the authors

GALINOVSKY Andrei Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Hospital-niy Lane, Bldg. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

DENISOV Aleksandr Vladimirovich — Head of Department. ООО SKTB Plastik (446025, Syzran, Russian Federation, Samara region, Saratovskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: opriokr@sktb-plastik.ru).

GAVRILOVA Elena Anatolievna — Leading Strength Analysis Engineer. ООО SKTB Plastik (446025, Syzran, Russian Federation, Samara region, Saratovskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

GORDEEV Sergei Aleksandrovich — Leading Design Engineer. ООО SKTB Plastik (446025, Syzran, Russian Federation, Samara region, Saratovskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

ALSHINA Svetlana Alekseevna — Manufacturing Process Engineer of the 1st Category. ООО SKTB Plastik (446025, Syzran, Russian Federation, Samara region, Saratovskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

EREMIN Sergei Aleksandrovich — Project Manager. ООО SKTB Plastik (446025, Syzran, Russian Federation, Samara region, Saratovskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: grp2@sktb-plastik.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Денисов А.В., Гаврилова Е.А., Гордеев С.А., Альшина С.А., Еремин С.А. Выбор схемы подкрепления параболической антенны из композиционных материалов с эллиптической линией раскрыва. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 9, с. 54–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-54-68

Please cite this article in English as:

Galinovsky A.L., Denisov A.V., Gavrilova E.A., Gordeev S.A., Alshina S.A., Eremin S.A. The Selection of the Reinforcement Scheme for a Parabolic Antenna Made of Composite Materials with an Elliptical Aperture Line. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 9, pp. 54–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-9-54-68