

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ СПУТНИКОВЫХ АНТЕНН

М. А. Дремухин✉, В. Н. Наговицин

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация

Сокращение сроков проведения прочностного анализа конструкции в процессе изготовления формообразующей оснастки с использованием современных инструментов виртуального компьютерного проектирования и моделирования, а именно математического 3D-моделирования, в условиях мелкосерийного производства с применением аддитивных технологий является основной задачей. При помощи числовой дискретизации исследуемая модель разбивается на конечное множество элементов, которые могут принимать любую форму элемента и определяться в различных системах отсчета. Это позволит приближенно численно прогнозировать поведение материала во время его деформации под действием заданных нагрузок, приложенных к 3D-модели. Применение аддитивных технологий с использованием современного компьютерного моделирования, в основе которого лежит программное обеспечение, является актуальной задачей. Такой подход позволит разработать оснастку сложной геометрической формы, минуя стадии написания управляющих программ и выполнения трудоемких операций по первичной обработке изделия. В основе данного метода лежит процесс построения 3D-модели формообразующей оснастки, повторяющей форму отражающей поверхности рефлектора, с применением модифицированных высокотемпературных инженерных пластиков. Показан процесс оценки эффективности разрабатываемой модели на основе проведения прочностных расчетов запаса прочности, деформации, статического напряжения и перемещения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и изготовлении размеростабильных изделий сложной геометрической формы из неметаллических материалов, применяемых в аэрокосмической промышленности.

Ключевые слова: формообразующая оснастка, аддитивная технология, 3D-модель, математическое моделирование.

Введение

Постоянное совершенствование конструкций и ужесточение требований к радиотехническим характеристикам спутниковых антенн ставят серьезные задачи перед технологией их производства [1]. К конструкциям таких изделий предъявляются высокие требования по жесткости и размеростабильности при работе в широком диапазоне температур ± 125 °С, обусловленные четкой ориентацией антенн и обеспечением точности геометрии рабочей поверхности рефлектора. Максимальная погрешность отражающей поверхности должна составлять не более десятых или даже сотых долей миллиметра, в зависимости от

длины волны, при эксплуатации на орбите в экстремальных условиях космического пространства [2–4]. В основе формы рефлектора лежит, как правило, параболоид вращения с различными фокусными расстояниями или вырезка из такого параболоида с круглой или эллиптической диаграммой направленности [5].

Если стабильность геометрии рефлектора из полимерных материалов определяется конструкцией и технологией его изготовления [6; 7], то от конструкции и свойств выбранного материала формообразующей оснастки зависит первоначальная форма получаемого изделия, которая должна обеспечивать точность заданной геометрической формы и качество отражающей поверхности рефлектора на протяжении всего производственного процесса, а значит должна быть выполнена с еще более высоким допуском по точности

✉ d-max_70@mail.ru

рабочей поверхности, чем получаемое с помощью нее изделие.

Для процесса проектирования силовой конструкции, прежде всего на ранних этапах – технических предложений и эскизного проекта, широко применяются математические модели различной структуры [8–10].

С помощью компьютерного проектирования и моделирования, через совокупность абстрактных параметров и понятий, удается достаточно точно отображать и рассчитывать свойства протекающего процесса исследуемой силовой конструкции. Данный метод моделирования получил широкое применение на самых ранних стадиях проектирования, особенно эффективно применяется в условиях единичного и мелкосерийного производства. Это дает возможность определения наиболее рациональных параметров силовой конструкции схемы фиксации проектируемой модели, а также позволяет избежать грубых ошибок при проектировании. При этом у конструкторов-проектировщиков появляется возможность, даже при отсутствии достаточного опыта, рассматривать и внедрять относительно новые требования и иные инновационные решения в разрабатываемую конструкцию [11–13].

Непрерывное совершенствование объектов производства в значительной степени обеспечивается прогрессивной технологической оснасткой, создание которой без новых специальных материалов на определенном этапе становится невозможным. Поэтому длительное использование в производстве технологической оснастки, изготовленной из одних и тех же морально устаревших материалов, становится тормозом технического прогресса [14].

1. Постановка задачи

Оснастка должна быть изготовлена при помощи трехмерной печати по технологии FDM (Fused Deposition Modelling) с использованием 3D-принтеров за счет расплавления нити пластика в экструдере и послойного выращивания изделия путем наплавления материала на рабочую поверхность слой за слоем, воссоздавая желаемую форму электронной модели из выбранного материала [15].

Поэтому проектирование оснастки ведется с учетом ее изготовления при помощи 3D-печати с применением автоклавного метода полимеризации при температуре до 130 °С и рабочем давлении на поверхность формообразующей оснастки в 0,9 МПа. Это дает возможность формования цельных рефлекторов диаметром до 3500 мм из полимерных композиционных материалов (ПКМ) по технологии Resin Transfer Molding (пропитка под давлением) для единичного и мелкосерийного производства.

Основные этапы математического 3D-моделирования:

1. Создание виртуальной 3D-модели для выполнения прочностного анализа конструкции.
2. Подбор материала для изготовления и моделирования проектируемой оснастки.
3. Выбор схемы приложения нагрузки и плоскости для крепления 3D-модели.

2. Описание построенной конструкции 3D-модели

Для определения прочностных свойств проектируемой оснастки и моделирования процесса нагрузок, которые действуют на ее рабочую поверхность в процессе эксплуатации, была построена ее 3D-модель в программе SolidWorks, рабочая поверхность которой соответствует заданной форме отражающей поверхности рефлектора. Конструктивная схема приведена на рис. 1.

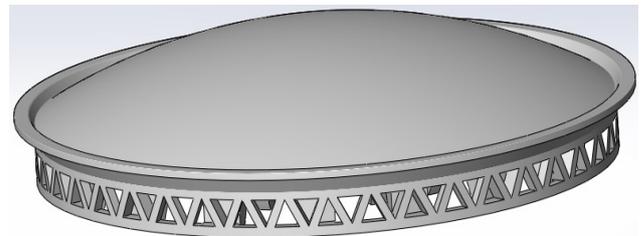


Рис. 1. 3D-модель оснастки

Оснастка состоит из формообразующей поверхности (ФОР), которая включает в себя формообразующую криволинейную часть толщиной 16 мм, повторяющую геометрию изделия с технологическим припуском и переходящую во вспомогательную прямолинейную часть, которая заканчивается бортом. ФОР оснастки устанавливается на опорную структуру, с тыльной стороны которой вдоль линии, эквидистантной границе перехода криволинейной части в прямолинейную, установлено основание с толщиной стенки 60 мм и выполненными технологическими отверстиями в виде треугольников для облегчения веса конструкции. Рабочая поверхность оснастки устанавливается на поддерживающий каркас, который состоит из ребер жесткости с толщиной стенки одного ребра в 35 мм. Конструкция силового каркаса изображена на рис. 2. Основные параметры оснастки: формообразующая поверхность с отбортовкой имеет диаметр 3760 мм с площадью рабочей поверхности 102 тыс. мм² и высотой 750 мм.

Такая конструкция позволит равномерно распределить перемещения и напряжения от действующих нагрузок в процессе изготовления рефлектора по всей ФОР. А каркас из ребер в виде решетки обеспечивает дополнительную жесткость и прочность конструкции для формирования на ней изделий из ПКМ.

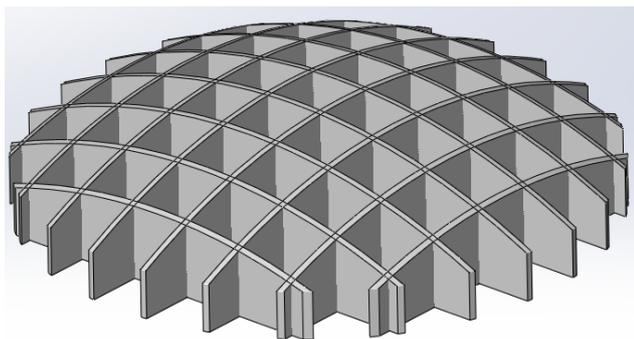


Рис. 2. Поддерживающий каркас из ребер жесткости

3. Выбор материала для проектируемой оснастки

При подборе материала необходимо обеспечить лучшее соотношение показателей его качества с весьма противоречивыми свойствами, удовлетворяющим заданным требованиям для проектируемой оснастки. При единичном и мелкосерийном производстве важными критериями

оценки являются сроки изготовления и себестоимость продукции. Выбранный материал изготавливаемого рефлектора и оснастки должен быть совместим по температурному коэффициенту линейного расширения, обладать высокой жесткостью и прочностью на разрыв. Сочетание данных показателей сильно повысит геометрическую точность и поможет избавиться от коробления.

С учетом перечисленных выше требований для изготовления формообразующей оснастки были применены модифицированные высокотемпературные инженерные пластики, а именно филаменты на основе полиамида с наполнителем в виде углеволокна марки PA12CF. Данный материал подходит для печати на 3D-принтерах по технологии FDM/FFF, может применяться в машиностроении, инженерии, подходит для применения в жестких агрессивных условиях с воздействием высоких нагрузок. Материал представляет собой композитный пластик из полиамида-12, армированный углеродными волокнами. Основные показатели материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные показатели материала

Свойство	Значение	Единицы измерения
Модуль упругости	7,5	ГПа
Коэффициент Пуассона	0,38	
Модуль сдвига	2880	МПа
Массовая плотность	1100	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	76	МПа
Предел текучести	64	МПа
Коэффициент теплового расширения	10 ⁻⁶	С ⁻¹
Теплопроводность	0,3	Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	1700	Дж/(кг·К)

4. Процесс моделирования нагрузки

Поскольку оснастка обладает значительными габаритами и, как следствие, массой и подвергается в процессе эксплуатации операциям перемещения и нагрева, производится также оценка весовых и термических деформаций. Прочностной расчет смоделированной оснастки был произведен с помощью конечно-элементного моделирования в программе SolidWorks Simulation. Для расчета значений деформации в рабочем положении во время полимеризации использованы объемные 10-ти узловые тетраэдры. Поверхность 3D-модели в виртуальном пространстве разбивается на множество элементов в виде треугольников, тем самым образуя сетку по всему контуру модели. При

пересечении границ элементов образуются узлы, выбранное число узлов – 15862, число элементов – 18042, выбранное количество пересечений позволит с меньшей долей вероятности допустить ошибку при расчетах.

К расчетной схеме смоделированной оснастки прикладывались следующие нагрузки:

- воздействие температуры в 140 °С на всю модель оснастки;
- нагрузка от рабочего давления;
- нагрузка от массы изготавливаемого рефлектора;
- нагрузка от собственного веса оснастки.

Таким образом, суммарная нагрузка составила 1100 МПа. Действие нагрузки равномерно распределено по рабочей поверхности оснастки и совпадает с направлением действия силы тяжести.

сти вдоль оси OY , схема нагружения приведена на рис. 3, схема крепления модели с опорой по всей плоскости соприкосновения для «фиксации» граней модели представлена на рис. 4. Данная плоскость предназначена для установки на ровную поверхность, например, пол, и перемещение которой в ходе анализа должно быть строго ограничено. Программа находит общий вектор узловых перемещений, затем определяет элементные векторы узловых перемещений, через которые с помощью интерполяции функции формы рассчитываются перемещения заданных точек путем пересечения их с элементами по всей конструкции модели.

запаса прочности в различных точках модели. При этом запас прочности определяется отношением фактического напряжения к пределу текучести выбранного материала. По распределению цвета и его интенсивности можно отследить, в каких точках величина запаса прочности в модели оснастки испытывает наибольшее и наименьшее значение от воздействия на нее приложенных нагрузок. Обозначение нагрузок и крепления для лучшего визуального анализа результата сделаны невидимыми.

186

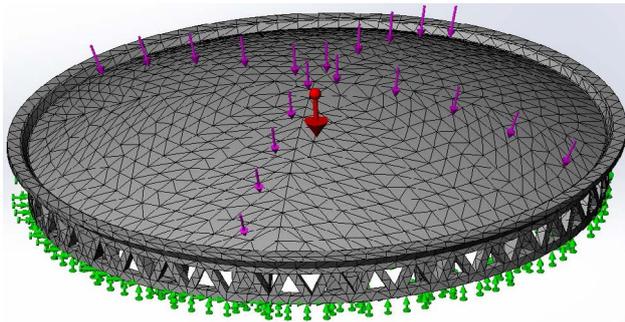


Рис. 3. Схема нагружения оснастки

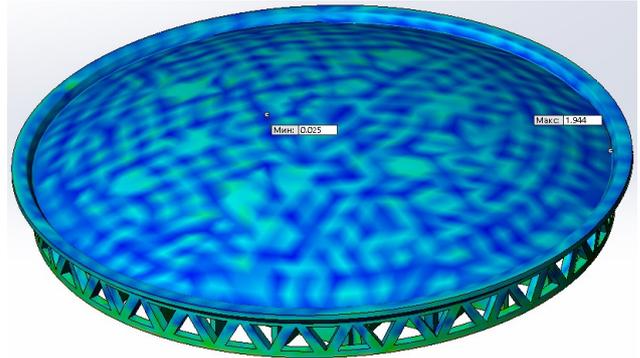


Рис. 5. Вид со стороны формообразующей поверхности

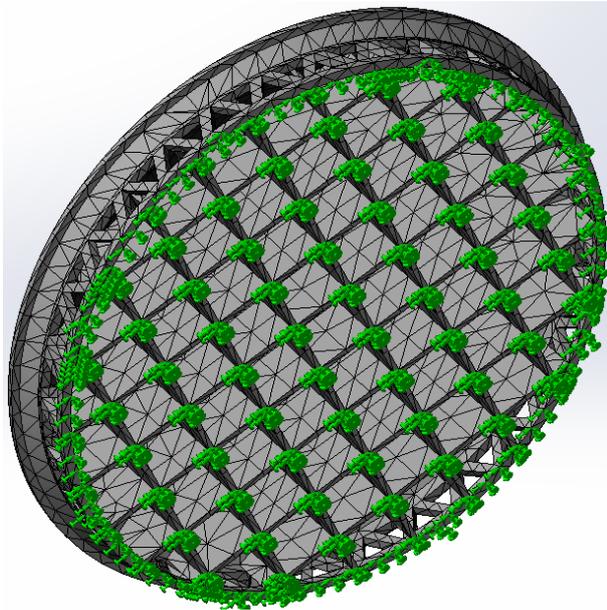


Рис. 4. Схема фиксации граней оснастки

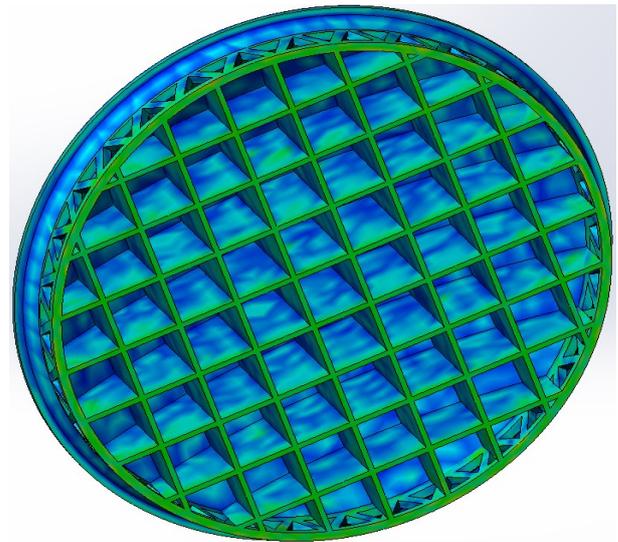


Рис. 6. Вид со стороны ребер жесткости

По результатам математического моделирования были получены следующие результаты:

На рис. 5 и 6 изображена эпюра статического узлового напряжения, которая определяет интенсивность распределения внутренних сил по конструкции модели, тем самым показывая взаимодействие материальных частиц материала внутри тела расчетной модели. По величине перемещения частиц можно судить о возможности нарушения целостности конструкции и о величине

На основе численных расчетов можно сделать вывод: максимальные напряжения возникают в местах соединения борта формообразующей поверхности с основанием оснастки и достигают 1,944 МПа, а в центре модели напряжения стремятся к минимуму и достигают 0,025 МПа. По величине максимального напряжения можно судить о показателе запаса прочности, который на порядок больше чем 1,0, это значит, что выбранный материал по всей конструкции модели под действием приложенных нагрузок не достиг предела текучести.

Эпюра статического перемещения, которая изображена на рис. 7 и 8, показывает, во сколько раз было изменено положение в пространстве всего изделия или его элемента конструкции.

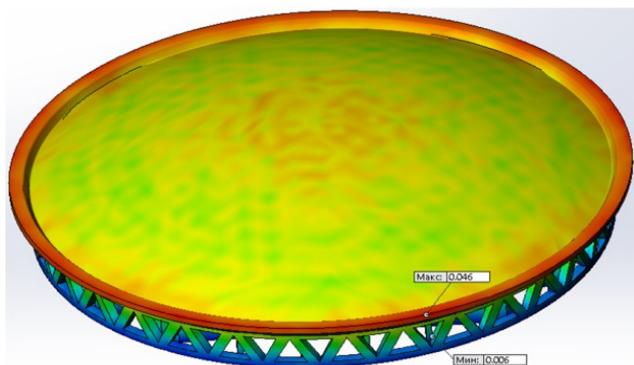


Рис. 7. Вид со стороны формообразующей поверхности

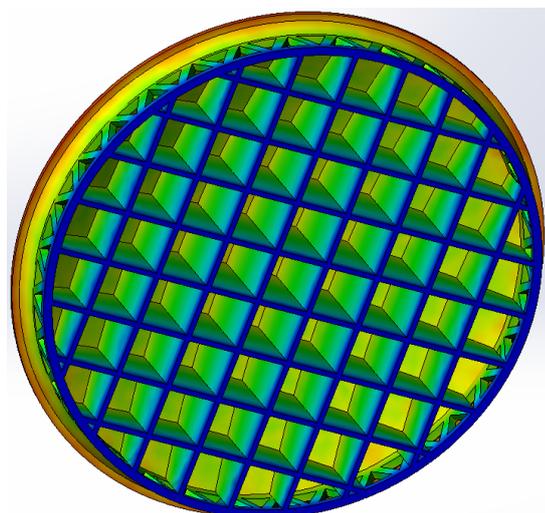


Рис. 8. Вид со стороны ребер жесткости

На основе численных расчетов можно сделать вывод: максимальное перемещение (поверхность красной зоны) имеет отбортовка оснастки, наибольшее значение которой составляет 0,064 мм. Поверхность желтой зоны равномерно распределена по всей формообразующей поверхности и имеет значение 0,035 мм. Минимальное значение перемещения имеет поверхность, которая предназначена для установки оснастки на ровную плоскость, ее значение составляет 0,006 мм.

При эксплуатации оснастки обязательным является использование трех опор, расположенных в местах пересечения ребер на диаметре 1920 мм, условная схема расположения опор изображена на рис. 9.

Деформированное состояние и область перемещения на поверхности оснастки под собственным весом показаны на рис. 10.

Максимальное перемещение составляет 0,04 мм и смещено к краю отбортовки. В случае установки опор при эксплуатации в другие места эффективность силовой конструкции уменьшится, что приведет к еще большему росту отклонений в рабочей области.

Спроектированная конструкция поддерживающего каркаса из ребер жесткости позволяет с помощью изменения толщины ребра регулировать величину деформаций в изделии. Числовые значения результатов моделирования ребер жесткости с приложением нагрузки согласно рис. 3 и рабочей температурой в 125 °С, с выбранным материалом марки PA12CF представлены в табл. 2.

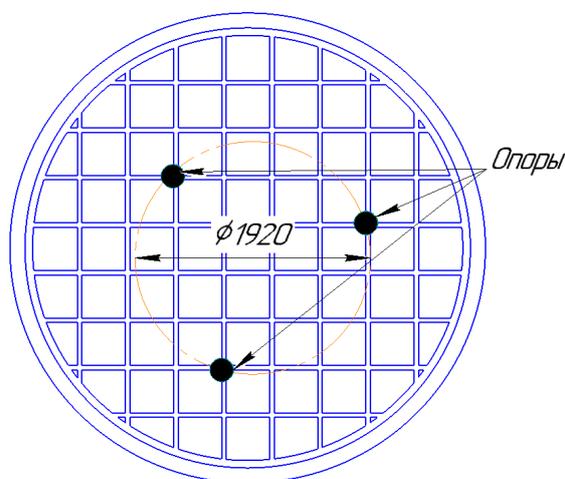


Рис. 9. Расположение точек опоры оснастки

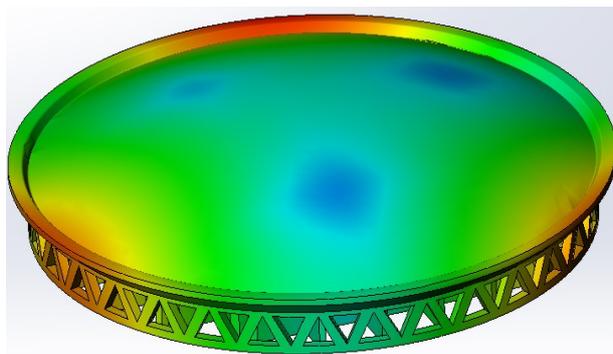


Рис. 10. Деформированное состояние оснастки

Согласно числовым результатам моделирования, представленным в табл. 2, можно сделать вывод: при увеличении числа ребер, а также их толщины, значения перемещений, напряжений и площадь их воздействия на изделие постепенно снижаются, но при этом существенно увеличивается масса получаемого изделия. По данным таблицы можно подобрать оптимальное соотношение между деформацией и массой получаемого изделия, исходя из заданных требований, предъявляемых к рефлектору антенны.

Результаты моделирования

№	Количество ребер, шт.	Толщина ребра, мм	Максимальное перемещение, мм	Максимальное напряжение, МПа	∑ площадь воздействия максимального перемещения, мм ²	Вес, кг
1	16	20	0,097	1,33	26790	1297
2		25	0,082 (-0,015)	1,13 (-0,2)	14840 (-11950)	1419 (+122)
3		30	0,074 (-0,008)	1,00 (-0,13)	6680 (-8160)	1539 (+120)
4		35	0,065 (-0,009)	0,89 (-0,11)	5030 (-1650)	1657 (+118)
5		40	0,060 (-0,005)	0,79 (-0,1)	4580 (-450)	1774 (+117)
6		45	0,055 (-0,005)	0,73 (-0,06)	4230 (-350)	1889 (+115)
1	18	20	0,082	1,10	45990	1428
2		25	0,071 (-0,011)	0,92 (-0,18)	20450 (-25540)	1488 (+135)
3		30	0,062 (-0,009)	0,80 (-0,12)	14630 (-5820)	1621 (+133)
4		35	0,056 (-0,006)	0,72 (-0,08)	13380 (-1250)	1752 (+131)
5		40	0,051 (-0,005)	0,66 (-0,06)	8860 (-4520)	1881 (+129)
6		45	0,047 (-0,004)	0,61 (-0,05)	5770 (-3090)	2008 (+127)

Примечание:

В скобках указана разница от предыдущего значения.

Масса изделия указана при 100 % заполнении пластиком.

Заключение

В данной статье рассмотрен процесс моделирования формообразующей оснастки для ее изготовления при помощи трехмерной печати по технологии FDM/FFF из высокотемпературных пластиков, спроектирована 3D-модель.

По результатам моделирования видно, что спроектированная конструкция позволяет равномерно распределить перемещения по всей ФОП оснастки, при этом максимальные значения напряжений и перемещений смещены на отбортовку. Каркас из ребер в виде решетки равномерно распределяет по всем ребрам жесткости рабочее давление от прикладываемой нагрузки и обе-

спечивает приемлемый уровень деформации под собственным весом оснастки, который не приводит к значительным геометрическим изменениям рабочей поверхности, формируемых на ней изделий из ПКМ.

Таким образом, описанный подход к моделированию и изготовлению конструкции даст возможность создавать и рассчитывать объемные 3D-модели со сложной геометрической формой и на ранних этапах достаточно точно отображать свойства исследуемой силовой конструкции. Тем самым позволит определить рациональные параметры конструктивно-силовой схемы и в дальнейшем избежать ошибок при проектировании формообразующей оснастки.

Список литературы

- [1] Моделирование прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов : отчет о НИР (промежуточ.) / НИ ТГУ ; рук. Пономарев С. В.; исполн. : Бельков А. В. [и др.]. Томск, 2013. 454 с.
[2] Поляк В. С., Бервалдс Э. Я. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов : учеб.-метод. пособие.

- Рига : Зинатне, 1990. 526 с.
- [3] Кочержский Г. Н. Антенно-фидерные устройства : учеб. для вузов. М. : Радио и связь, 1981. 280 с.
- [4] Imbriale W. A., Gao S., Vossia L. Space Antenna Handbook. United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd. 2012. 744 p.
- [5] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
- [6] Крыжановский В. К., Николаев А. Ф. Технология полимерных материалов : учеб. пособие. СПб. : Профессия, 2008. 544 с.
- [7] Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С., Берлин А. А. Полимерные композиционные материалы: свойства, структура, технология. СПб. : Профессия, 2008. 560 с.
- [8] Резник С. В., Просунцов П. В., Азаров А. В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженернофизический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674–680.
- [9] Рудаков К. Н. Femap 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. Киев : КПИ, 2011. 317 с.
- [10] Clough R. W. The finite element method in plane stress analysis // J. Struct. Div. ASCE. Proc. 2nd A. S. C. E. Conf. on Electronic Computation. 1960. pp. 345–378.
- [11] Вержбицкий В. М. Основы численных методов : учеб. для вузов. М. : Высш. шк., 2005. 840 с.
- [12] Алямовский А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.
- [13] Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows : учеб. пособие. М. : ДМК Пресс, 2003. 448 с.
- [14] Боголюбов В. С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов. М. : Машиностроение, 1979. 183 с.
- [15] Зотов О. Ю., Фролов Д. А. Особенности метода изготовления изделий путем послойного наплавления материала // Ученый XXI века. 2016. № 1 (14). С. 7–11.

DEVELOPMENT AND MODELING OF NON-METALLIC FORM-FORMING RIGGER FOR MANUFACTURE OF POLYMER COMPOSITION REFLECTORS FOR SATELLITE ANTENNAS

M. A. Dremukhin, V. N. Nagovitsin

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

Reducing the time for carrying out the strength analysis of a structure in the process of manufacturing shaping tooling using modern tools of virtual computer design and modeling, namely mathematical 3D modeling in a small-scale production with the use of additive technologies, is the main task. With the help of numerical discretization, the investigated model is divided into a finite set of elements, which can take any form of the element and be defined in different reference systems. This will make it possible to predict approximately numerically the behavior of the material during its deformation under the action of the given loads applied to the 3D model. The use of additive technologies with the use of modern computer modeling, which is based on software, is an urgent task. This approach will make it possible to develop equipment with a complex geometric shape, bypassing the stage of writing control programs and performing labor-intensive operations for the primary processing of the product. This method is based on the process of constructing a 3D model of the shaping tooling that repeats the shape of the reflective surface of the reflector, using modified high-temperature engineering plastics. The process of evaluating the effectiveness of the developed model is shown on the basis of strength calculations, safety factor, deformation, static stress and displacement. The results of the work can be used in the design and manufacture of dimensionally stable products of complex geometric shapes from non-metallic materials used in the aerospace industry.

Keywords: molding equipment, additive technology, 3D model, mathematical modeling.

References

- [1] Ponomarev S. V., Belkov A. V. *Modelirovanie precizionnykh antennykh reflektorov iz polimernykh kompozicionnykh materialov* [Modeling precision antenna reflectors made of polymer composite materials]. Tomsk, NI TSU, 2013, 454 p. (In Russian)
- [2] Polyak V. S., Bervalds E. Ya. *Precizionnye konstrukcii zerkal'nykh radioteleskopov* [Precision designs of mirror radio telescopes]. Riga, Zinatne, 1990, 526 p. (In Russian)
- [3] Kocherzhsky G. N. *Antenno-fidernye ustrojstva* [Antenna-feeder devices]. Moscow, Radio and communication, 1981, 280 p. (In Russian)
- [4] Imbriale W. A., Gao S., Boccia L. *Space Antenna Handbook*. United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd, 2012, 744 p.
- [5] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011, 488 p. (In Russian)
- [6] Kryzhanovsky V. K., Nikolaev A. F. *Tekhnologiya polimernykh materialov* [Technology of polymeric materials]. St. Petersburg, Profession, 2008, 544 p. (In Russian)
- [7] Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S., Berlin A. A. *Polimernye kompozicionnye materialy: svoystva, struktura, tekhnologiya* [Polymer composite materials: properties, structure, technology]. St. Petersburg, Profession, 2008, 560 p. (In Russian)
- [8] Reznik S. V., Primaysov P. V., Azarov A. V. *Obosnovanie konstruktivno-komponovochnoj skhemy reflektora zerkal'noj kosmicheskoy anteny s vysokoy stabil'nost'yu formy i maloj pogonnoj plotnost'yu* [Substantiation of the design-layout diagram of the reflector of a reflector space antenna with high shape stability and low linear density] // *Engineering Journal*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 674–680. (In Russian)
- [9] Rudakov K. H. *Femap 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-elementnoe modelirovanie konstrukcij* [Femap 10.2.0. Geometric and finite element modeling of structures]. Kiev, KPI, 2011, 317 p. (In Russian)
- [10] Clough R. W. The finite element method in plane stress analysis // *J. Struct. Div., ASCE, Proc. 2nd A. S. C. E. Conf. on Electronic Computation*, 1960, pp. 345–378.
- [11] Verzhbitsky V. M. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of Numerical Methods]. Moscow, High School, 2005, 840 p. (In Russian)
- [12] Alyamovsky A. A. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike* [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2008, 1040 p. (In Russian)
- [13] Shimkovich D. G. *Raschet konstrukcij v MSC/NASTRAN for Windows* [Structural analysis in MSC / NASTRAN for Windows]. Moscow, DMK Press, 2003, 448 p. (In Russian)
- [14] Bogolyubov B. C. *Formoobrazuyushchaya osnastka iz polimernykh materialov* [Form-forming equipment made of polymeric materials]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979, 183 p. (In Russian)
- [15] Zotov O. Yu., Frolov D. A. *Osobennosti metoda izgotovleniya izdelij putem poslojnogo naplavljeniya materiala* [Features of the method of manufacturing products by layer-by-layer fusion of material] // *Scientist of the XXI century*, 2016, no. 1 (14), pp. 7–11. (In Russian)

Сведения об авторах

Дремухин Максим Андреевич – инженер АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнёва в 2018 году. Область научных интересов: разработка и проектирование крупногабаритных изделий.

Наговицин Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета, главный специалист по прочности антенных систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Пермский государственный университет имени М. Горького в 1977 году. Область научных интересов: механика композиционных материалов.