

УДК 621.396.677.8

Применение композитных материалов в радиолокационной технике. Отражатель антенного устройства Доплеровского метеорологического радиолокатора

**Шумов А. В.^{1,*}, Плахотниченко А. А.¹,
Титова М. В.¹**

[*shum_ov@mail.ru](mailto:shum_ov@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье приведены результаты применения армированных полимерных композитных материалов в качестве отражателя для антенного устройства доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С. Указываются основные преимущества использования композитных материалов этого типа в антенных отражателях большого диаметра. Приведена конструкция отражателя с результатами прочностного расчета, а также результаты экспериментальных исследований изготовленного антенного отражателя с использованием лазерного трехмерного сканера Surphaser 25HSX. Работы выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках программы поддержки университетов в 2013-2014 гг.

Ключевые слова: отражатель, армированный полимерный композитный материал, конечно-элементная модель, оптические измерения, конструкция

Введение

Антенные системы играют важную роль при решении задач в области радиосвязи, радиолокации, радионавигации, мониторинге метеорологической обстановки. К конструктивным особенностям и техническим характеристикам изделий, используемых в таких системах, предъявляются высокие требования по прочности, точности и технологичности.

Статья посвящена особенностям применения композитных материалов в радиолокационной технике на примере отработки технологии создания отражателя антенного устройства ДМРЛ-С – радиолокационной станции сантиметрового диапазона длин волн. В настоящей работе описывается впервые созданный отражатель сантиметрового метеорологического радиолокатора большого диаметра, изготовленный полностью из композитного материала с сотовым заполнителем переменной толщины.

Радиолокатор ДМРЛ-С предназначен для мониторинга метеорологической обстановки: высота, скорость перемещения и плотность облаков, интенсивность и тип осадков, параметры ветра и т.п. Радиолокационная сеть, состоящая из Доплеровских метеолокаторов

обеспечивает достоверный прогноз состояния метеорологической обстановки в зоне покрытия и успешно применяется подразделениями Росгидромета и метеорологическими службами аэродромов различных назначений, а также для нужд Министерства обороны.

Российские и зарубежные аналоги метеорологического радиолокатора изготавливаются из алюминия, что уже давно не удовлетворяет современным требованиям по прочности и массе для данных изделий, кроме того, алюминиевые отражатели температурно неустойчивы. Искажение формы поверхности алюминиевого варианта исполнения отражателя радиолокатора ДМРЛ-С под нагрузкой достигает около 1 см, тогда как требуемым значением является величина среднего квадратического отклонения формы поверхности менее 1 мм. Столь высокие точности поверхности при оптимальных массо-габаритных характеристиках антенны достижимы только за счет применения современных композиционных материалов [1 - 3].

Обычно при изготовлении отражателей радиолокаторов используется многослойный композиционный материал без сотового заполнителя, однако данная технология применима только для относительно небольших антенн. Создание рефлекторов радиолокаторов диаметром свыше 4-х метров с большим радиусом кривизны представляет собой серьезную научно-технологическую проблему. Для обеспечения наилучшего соотношения геометрических, прочностных и массо-габаритных характеристик было принято решение изготовить отражатель в виде трехслойной оболочки переменной толщины.

Для антенн сантиметровых радиолокаторов диаметром свыше 4-х метров толщина сотового заполнителя может превышать 10..15 см, тогда как отработанный на сегодняшний день технологический уровень для подобных систем не превышает 5..7 см: здесь появляются дополнительные сложности, связанные с изготовлением методом горячего вакуумного формования – «толстый» сотовый заполнитель в процессе изготовления легко деформируется, что сразу приводит к браку.

Отдельной научно-технической задачей является оптимизация конструкции многослойной композитной панели с переменным сотовым заполнителем методом математического моделирования. Высокая сложность изделия требует верификации расчетных моделей по натурным экспериментальным данным [4].

1. Основная часть

Композиционные материалы (КМ) – это материалы, состоящие из двух и более компонентов (отдельных волокон или других армирующих составляющих и матрицы) и обладающие специфическими свойствами, отличными от суммарных свойств составляющих компонентов. Компоненты не растворяются и не поглощают себя друг друга любым другим способом. Свойства КМ нельзя определить только по свойствам компонентов, без учета их взаимодействия.

КМ различают по виду армирующего наполнителя: волокнистые; слоистые: наполненные, а также по виду связующей матрицы – наиболее часто используются полимерные матрицы. Полимерные композитные материалы (ПКМ) могут быть разделены на терморезистивные (связующая матрица при нагреве претерпевает необратимые структурные изме-

нения и химические реакции) и термопластичные (способны неоднократно размягчаться и затвердевать при термоциклировании).

Наибольшее распространение среди армированных ПКМ (АПКМ) получили КМ армированные волокнистыми структурами, как однонаправленными (уложенными в одном направлении), так и ткаными.

В отличие от обычных металлических сплавов, так часто применяемых в радиолокационной технике, композиционные материалы отличаются более высокими значениями удельных характеристик, а также меньшей склонностью к трещинообразованию. Применение таких материалов может повысить прочность и жесткость конструкции [5].

Прочность композиционных материалов во многом определяется свойствами волокон. Одной из основных задач матрицы является перераспределение напряжения между армирующими элементами, в связи с тем, что модуль упругости волокон значительно больше модуля упругости самой матрицы.

Основным преимуществом АПКМ является возможность широкого варьирования уровня прочности и жесткости по различным направлениям изделия.

Композиционные материалы имеют иной механизм разрушения при нагрузках и обладают более высоким сопротивлением усталости, чем традиционные материалы. Значительно меньшая чувствительность таких материалов к концентрации напряжений, низкая скорость распространения в них трещин – все это обеспечивают повышенную долговечность композитных изделий [6].

Именно исходя из вышеуказанных преимуществ АПКМ и было принято решение использовать их в конструкции Отражатель ДМРЛ-С. Поскольку диаметр изделия составляет 4,6 м, то изготовление изделия целиком из АПКМ представляет достаточно сложную технологическую задачу, предъявляющую высокие требования к точности и качеству выполнения технологических операций.

Исходя из совокупности свойств, экономических и технологических параметров было решено использовать АПКМ на основе эпоксидных связующих, армированных стекловолокном (как однонаправленным, так и тканым). Для увеличения жесткости и снижения веса было решено реализовать отражатель в виде трехслойной стеклопластиковой сэндвич-панели с сотовым наполнителем переменной высоты.

1.1. Конструкция

Изделие состоит из трёх частей – центральной и двух боковых, которые при сборке базируются друг относительно друга на штифтах по рёбрам жёсткости (рис. 1, 2).

Рабочая поверхность Отражателя описывается уравнением

$$X^2 + Y^2 = 4 \cdot F \cdot Z,$$

где F – фокусное расстояние. В нашем случае $F = 2160$ мм.

Габаритный диаметр отражателя: 4552 мм.

Габаритная высота отражателя 825 мм.

Поскольку разъем частей отражателя находится на расстоянии 912,5 мм от центра отражателя, что обеспечивает возможность транспортировки частей отражателя автомобилем транспортом (габариты наиболее крупной центральной части: 4552 x 1825 x 725 мм).

Два параллельных ребра жёсткости расположены по направлению, требующему наибольшую жесткость при изгибе под собственным весом при всех эксплуатационных положениях отражателя.

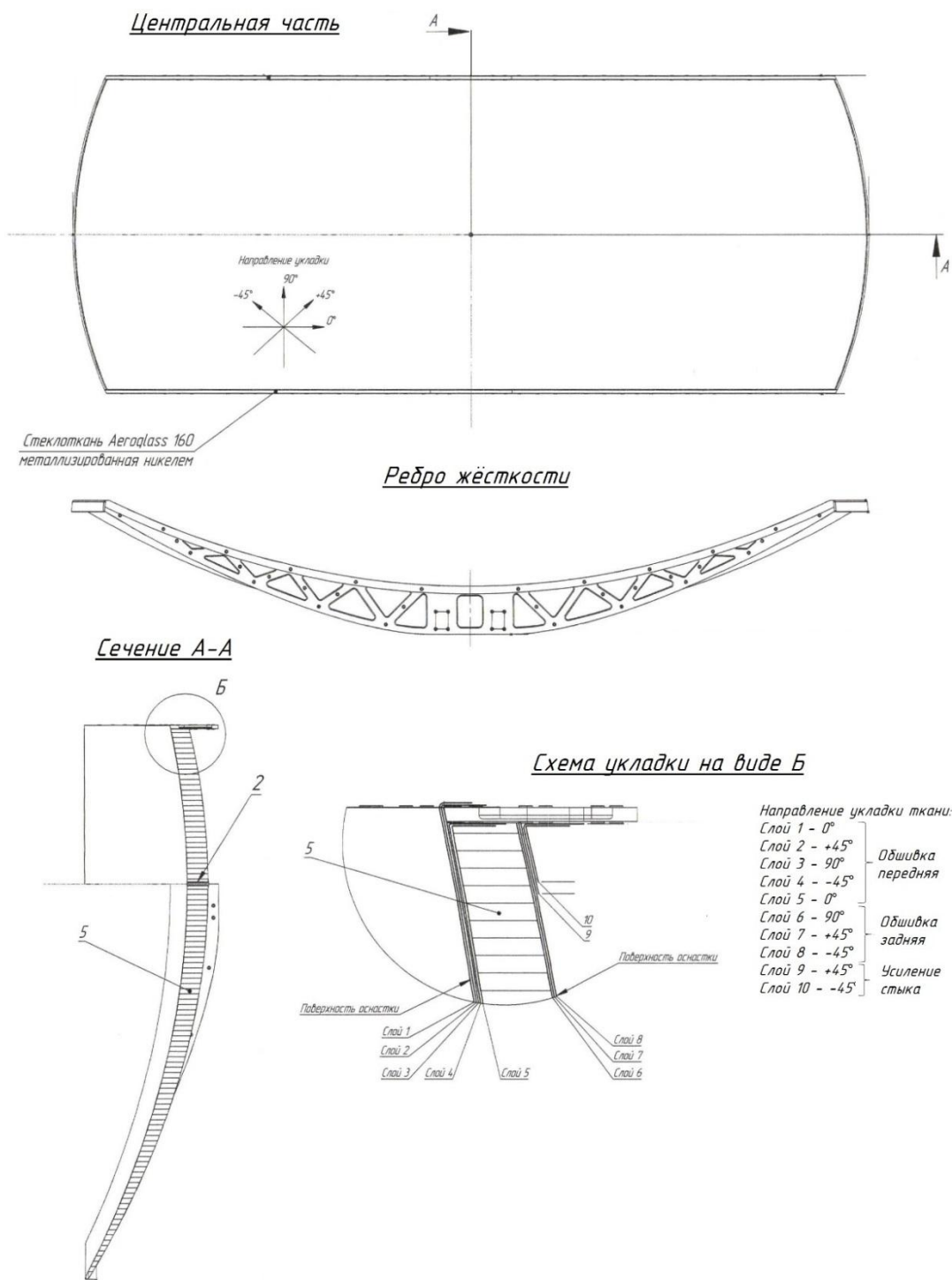


Рис. 1. Конструкция центральной части отражателя.

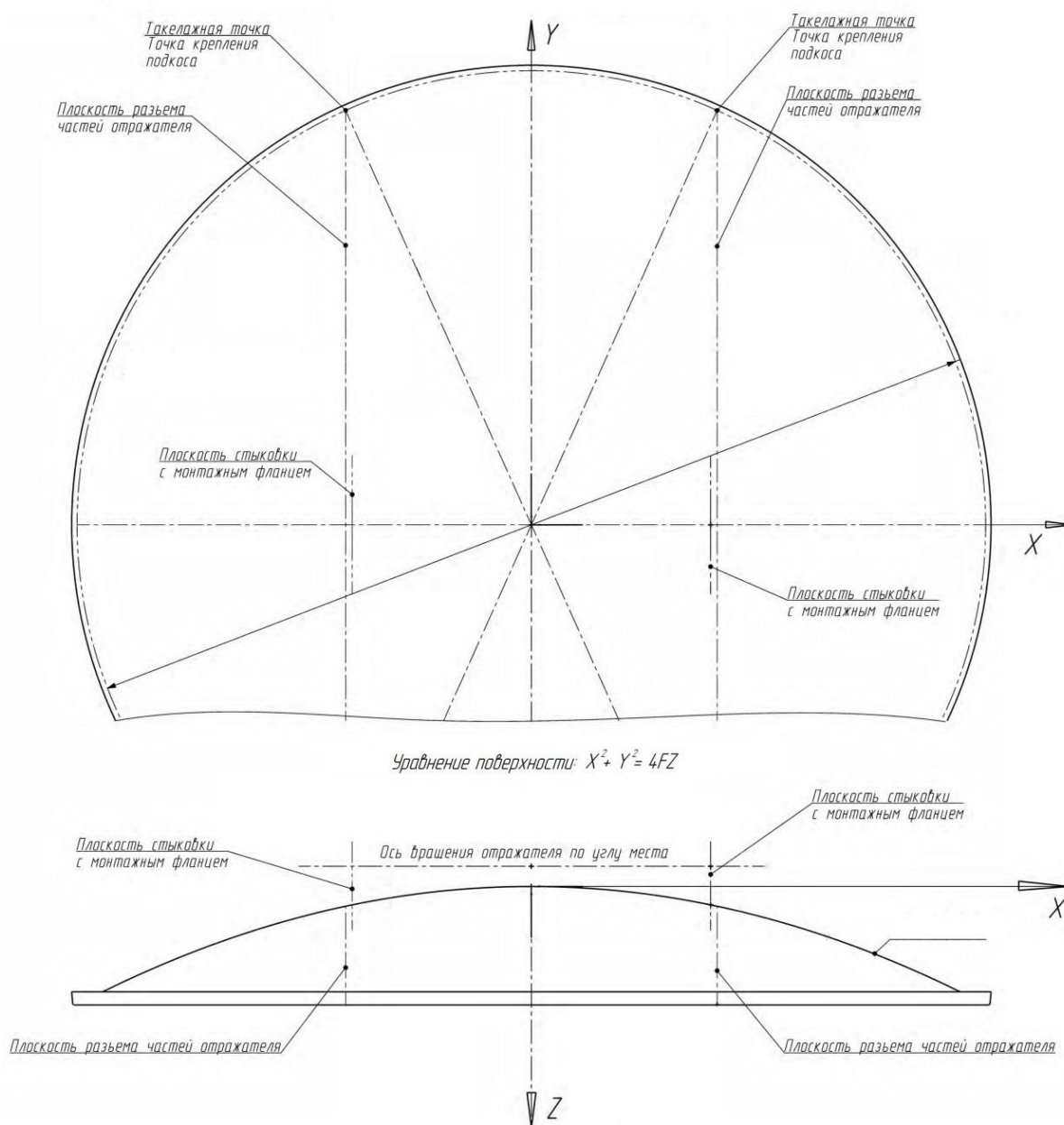


Рис. 2. Геометрическая схема разбора отражателя и закрепления на опорно-поворотном устройстве.

Конструктивно каждая из трех частей отражателя представляет собой изделие, имеющее две обшивки: лицевую и тыльную.

Лицевая обшивка представляет собой отражающую поверхность, выполненную из слоя металлизированной стеклоткани Aeroglass ($\rho=160 \text{ г/м}^2$), и несущие слои стеклопластика из препрега на основе стеклоткани Т-13-76 и связующего ЭДТ-69.

Механические характеристики стеклопластика образующего несущие слои:

Модуль упругости по направлению армирования 0° : $E_1 = 1920 \text{ кг/мм}^2$.

Предел прочности при растяжении по направлению армирования 0° : $\sigma_1 = 31 \text{ кг/мм}^2$.

Модуль упругости по направлению 90° : $E_2 = 1540 \text{ кг/мм}^2$.

Предел прочности при растяжении по направлению 90° : $\sigma_2 = 23 \text{ кг/мм}^2$.

Модуль сдвига: $G = 300 \text{ кг/мм}^2$.

Предел прочности при сдвиге: $\tau = 5 \text{ кг/мм}^2$.

Коэффициент Пуассона: $\mu = 0,15$.

Толщина стеклопластика из одного слоя препрега: $0,27 \text{ мм}$.

Плотность получаемого стеклопластика: 1650 кг/м^3 .

Тыльная обшивка выполнена из препрега на основе стеклоткани Т-13-76 и связующего ЭДТ-69.

Между лицевой и тыльной частью находится сотовый наполнитель ССП-1. Высота сотового наполнителя переменная и уменьшается по мере удаления от центра Отражателя.

По периметру отражателя выполнен окружной фланец из стеклоткани, увеличивающий жёсткость конструкции и обеспечивающий возможность крепления к нему кронштейнов тяг излучателя.

Использование подобной трехслойной конструкции, где склеивание обшивки с сотовым наполнителем происходит в процессе изготовления за одну технологическую операцию, имеет ряд преимуществ:

- достигается герметичность конструкции;
- повышается прочность и трещиностойкость изделия;
- снижается вес конструкции (30-50%);
- снижается трудоемкость изготовления деталей сложной формы двойной кривизны [7].

Конструкторские работы были проведены в САПР Siemens NX8.0 / Unigraphics в которой была создана математическая послойная модель отражателя, а также всей оснастки, используемой при изготовлении. В дальнейшем данная модель послужила основой для создания расчетной модели для прочностного расчета изделия.

1.2. Прочностной расчет

Для нашей конструкции в программе NX Nastran был произведён прочностной и жесткостной анализ конструкции методом конечных элементов [8, 9].

Расчетный случай нагружения - нагружение собственной весовой нагрузкой при различных эксплуатационных положениях отражателя. Наиболее сложным является случай при горизонтальном расположении плоскости раскрыва отражателя. Общая масса отражателя в расчете принималась равной 240 кг , что с высокой степенью точности равно массе готового изделия. Также учитывалась масса установленного излучателя в фокусе отражателя - 10 кг .

В дополнение рассматривалась ситуация нагружения отражателя инерционными силами при вращении его на опорно-поворотном устройстве вокруг вертикальной оси. Наиболее сложной ситуацией является вертикальное расположение плоскости раскрыва отражателя (угол места равен 0 град.). Угловая скорость вращения при расчете выбиралась согласно техническому заданию на проектирование отражателя - 72 град/с ($1,25 \text{ рад/с}$). Аэ-

родинамический расчет показал, что силами взаимодействия отражателя с окружающим его под радио-прозрачным укрытием воздухом можно пренебречь даже при начале вращения (когда воздух еще находится в неподвижном состоянии), в виду относительно небольшой скорости и ускорении вращения. Ветровой нагрузкой можно пренебречь, так как отражатель находится под радиопрозрачным укрытием.

При анализе строилась конечно-элементная модель одной четверти отражателя. По местам условного разделения устанавливались граничные условия симметричной связи. К излучателю прикладывалась сосредоточенная нагрузка, равная весу излучателя и тяг крепления. Тяги крепления заменялись жестким элементом-соединителем. Моделирование проводилось с использованием конечных элементов типа SHELL. Для моделирования материала использовалась ортотропная модель, которая наиболее точно соответствует используемым армированным полимерным композиционным материалам.

К отражателю была приложена распределенная весовая нагрузка, а также сосредоточенная нагрузка в центре масс излучателя, который крепится на тягах к четырем кронштейнам на окружном фланце отражателя. Тяги представлены в расчете как абсолютно жёсткие стержни, передающие весовую нагрузку на кронштейны отражателя (см. рис. 3).

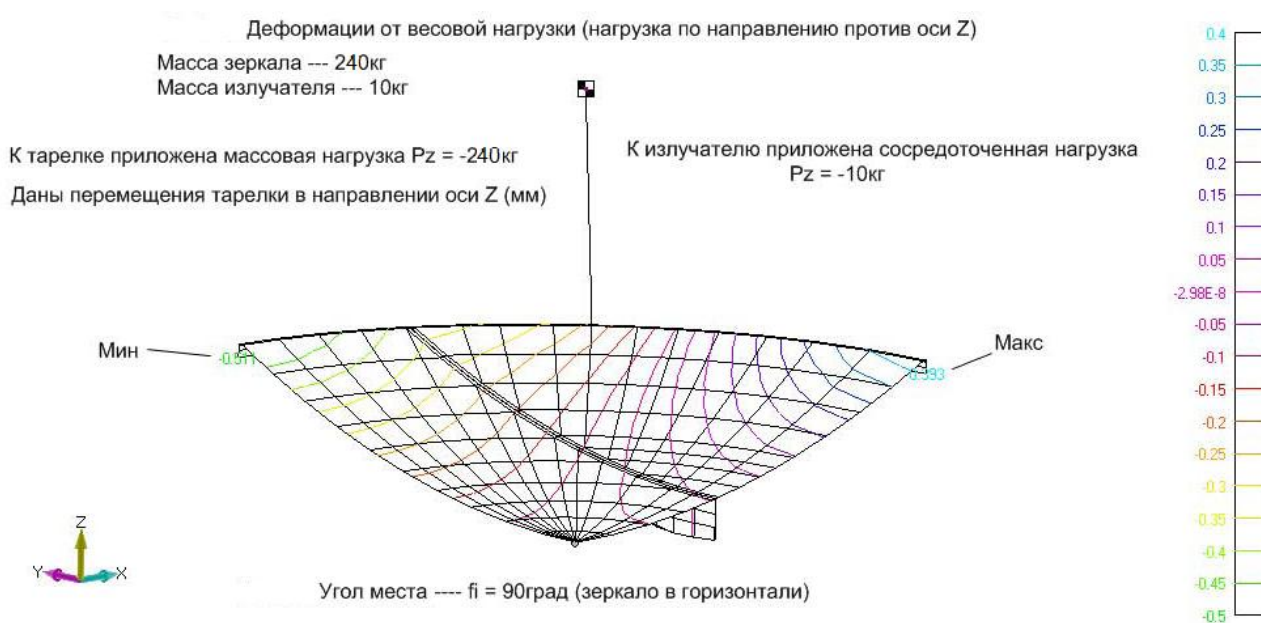


Рис. 3. Эпюра деформации от весовой нагрузки, наложенная на конечно-элементную модель.

Согласно расчету, в случае нагружения весовой нагрузкой наибольшие отклонения наблюдаются в крайних точках изделия и достигают 0,5 мм (см. рис. 3), что не превышает допустимых (1 мм). На рис. 5 даны деформации ребра жесткости, которые составили 0,4 мм.

Расчетные деформации от инерционных сил на порядок меньше (до 0,07 мм) и могут не приниматься во внимание (см. рис. 4).

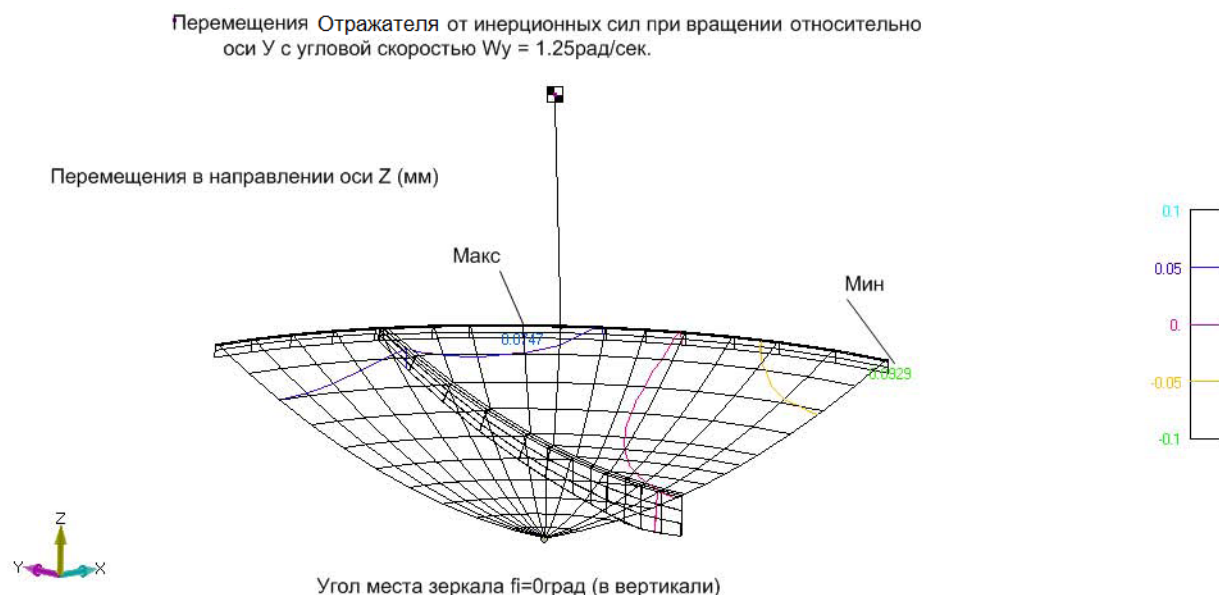


Рис. 4. Эпюра деформаций от инерционных сил при вращении отражателя, наложенная на конечно-элементную модель.

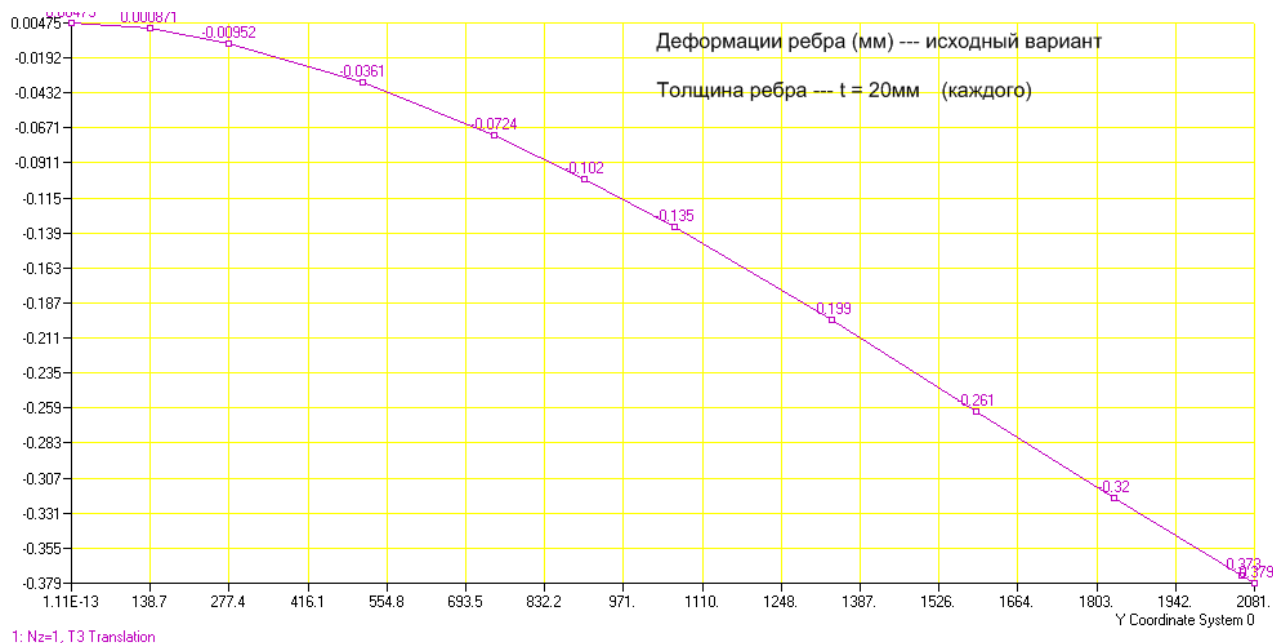


Рис 5. Эпюра деформаций ребра жесткости по длине при нагружении весовой нагрузкой.

1.3. Проверка жесткости изготовленного изделия

После изготовления изделия проводилось измерение среднеквадратического отклонения рабочей поверхности отражателя от теоретической поверхности с использованием сканера лазерного трехмерного Surphaser 25HSX. Измерение проводилось с одного установка сканера, согласно Руководству по эксплуатации производителя "Basis Software, Inc".

Измерение было проведено при положении отражателя 0 и 90 град по углу места, а также при нагружении изделия в различных точках грузом 45 кг перпендикулярно плоскости раскрытия отражателя. Полученные после измерения числовые данные сравниваются с теоретической поверхностью при помощи САПР "SpatialAnalyzer".

Инструментальная погрешность сканера Surphaser 25HSX составляет 0,2 мм при дальности измерений не более 20 м, что и было обеспечено при измерении.

Поскольку при измерениях под собственным весом не было выявлено существенных деформаций (превышающих точность измерения), для верификации расчетной модели была произведена серия измерений (см. рис. 6-9) с нагрузкой и последующее сравнение с результатом расчета по подготовленной расчетной модели при подобных ситуациях [10]. Отклонения результатов по максимальным деформациям не превысили 4%, что вполне соответствует требованиям к точности расчетных моделей для решения инженерных задач.

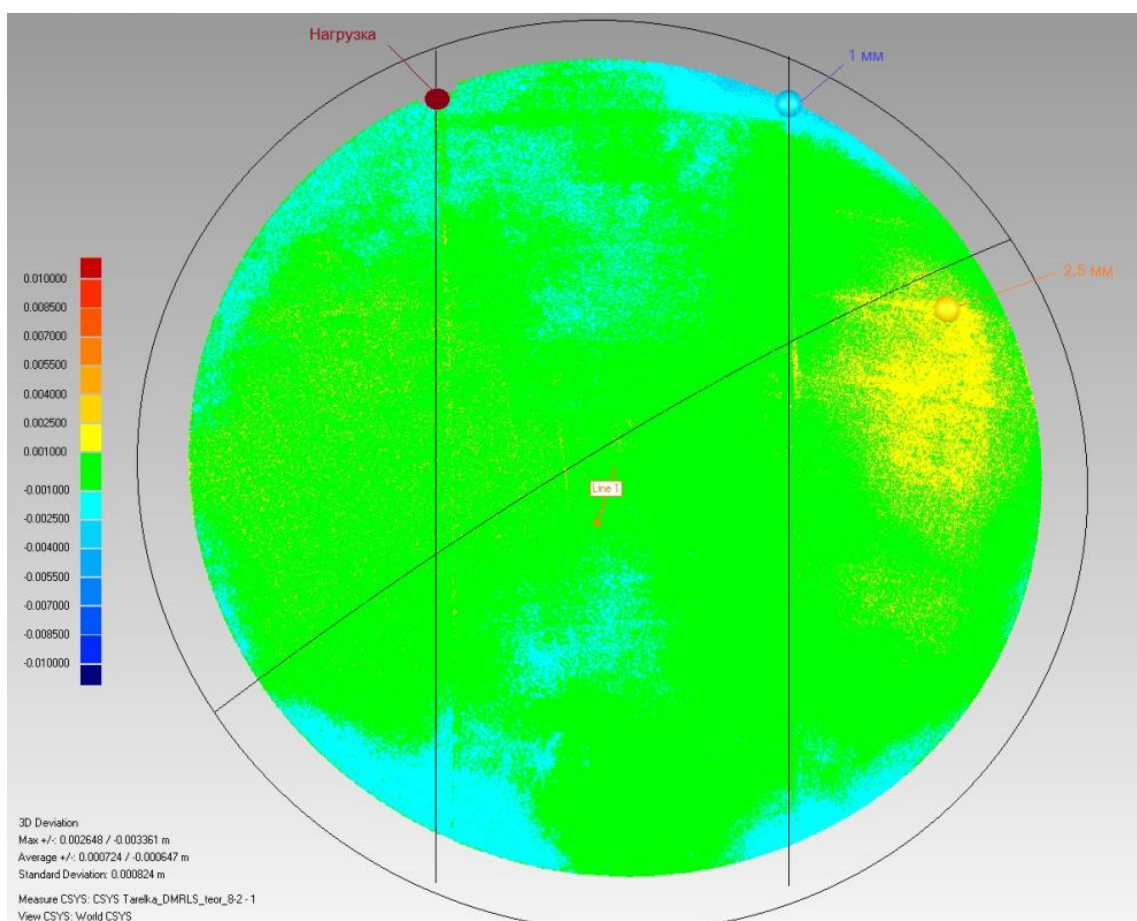


Рис. 6 Цветовая диаграмма отклонений поверхности изделия от теоретической поверхности при приложении нагрузки на конечную точку ребра жесткости.

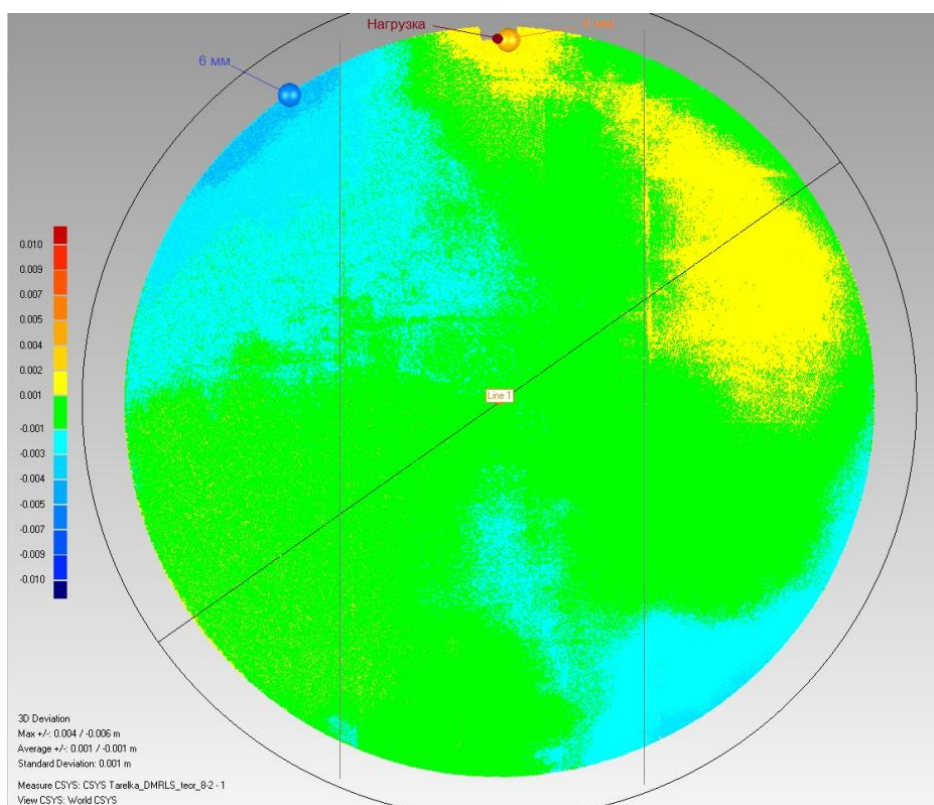


Рис. 7. Цветовая диаграмма отклонений поверхности изделия от теоретической поверхности при приложении нагрузки на центральную часть изделия между ребрами жесткости.

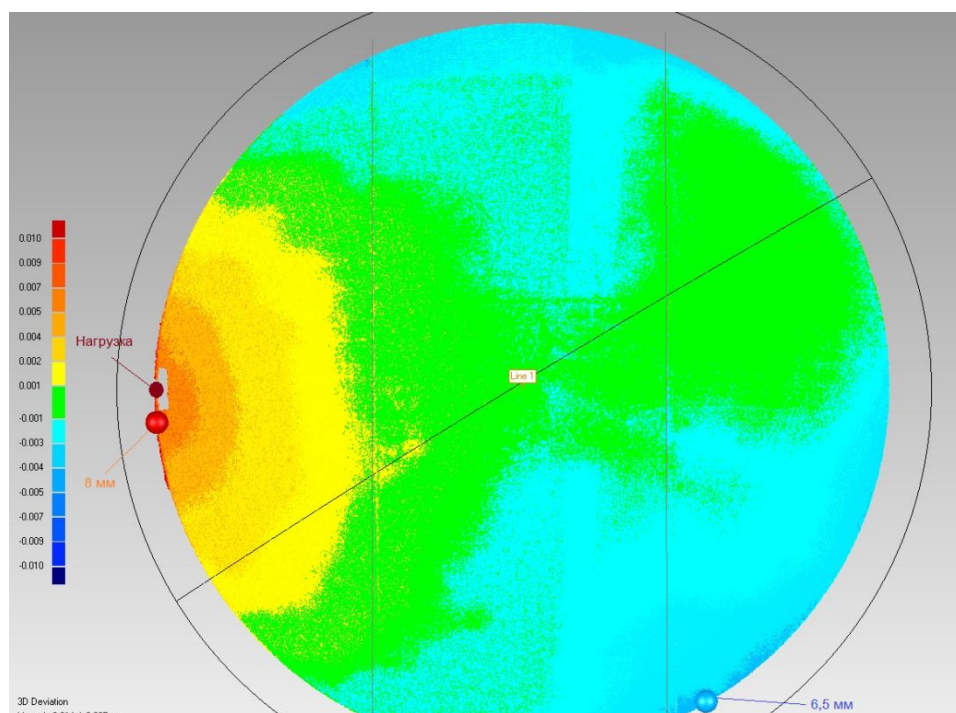


Рис. 8. Цветовая диаграмма отклонений поверхности изделия от теоретической поверхности при приложении нагрузки на боковую часть изделия в наиболее удаленную от ребер жесткости точку

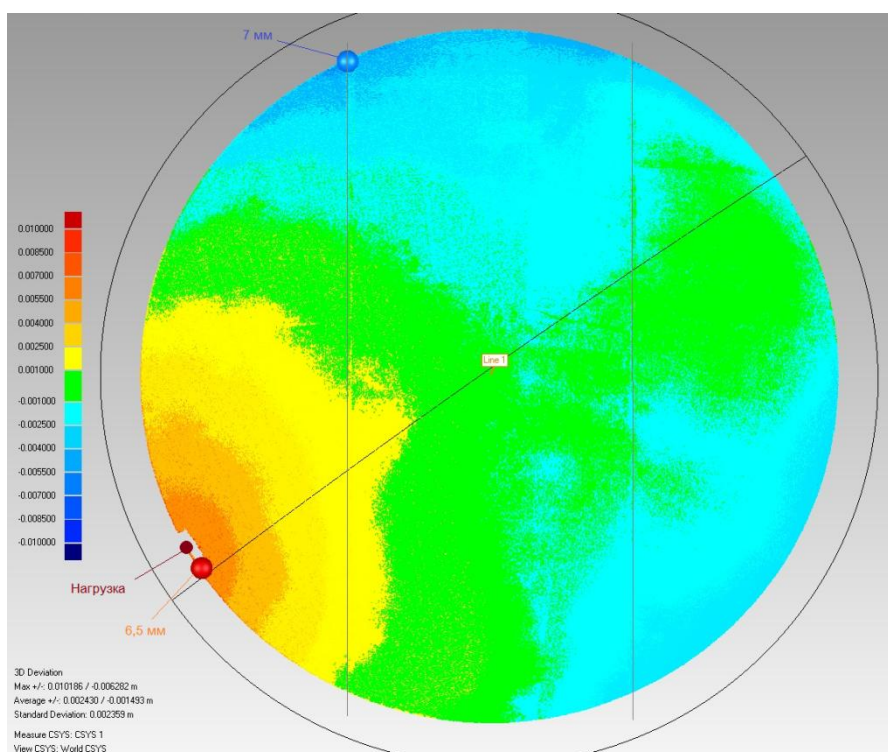


Рис. 9. Цветовая диаграмма отклонений поверхности изделия от теоретической поверхности при приложении нагрузки на боковую часть изделия в точку, равноудаленную от точки согласно рис.8 и ближайшего края ребра жесткости.

Заключение

В результате проведенных работ впервые был создан отражатель сантиметрового метеорологического радиолокатора большого (свыше 4,5 метров) диаметра и большим радиусом кривизны (фокусное расстояние – свыше 2 м), изготовленный полностью из композитного материала с сотовым наполнителем переменной толщины. Составлена расчетная модель и выполнена ее верификация по экспериментальным данным, при этом отработана технология выполнения оптических измерений геометрии изделия с помощью трехмерного лазерного сканера.

Масса созданного отражателя составила 242 кг, что в два раза меньше его алюминиевого аналога. Максимальная деформация в рабочих режимах эксплуатации по всей поверхности изделия не превышает 0,5 мм, что в полной мере удовлетворяет требованиям и позволит обеспечить наиболее точную работу изделия в любом положении антенной системы.

Описанный подход к созданию отражателей антенных устройств большого диаметра из композитных материалов с сотовым наполнителем переменной толщины обеспечит при его внедрении в производство создание крупноформатных антенных систем с повышенными характеристиками прочности, улучшенными массо-габаритными параметрами и точностью поверхности антенн.

Статья выпущена в рамках НИОКТР "Создание высокотехнологичного производства композитных агрегатов" выполняемого МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО «НПО «ЛЭМЗ» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, в целях реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», при финансовой поддержке по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Банщикова М.Н., Жирнова Е.А. Совершенствование технологии изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе анализа кинетики процессов // Решетневские чтения: материалы XVIII Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, 11-14 ноября 2014 г.). Ч. 1. Красноярск, 2014. С. 382-383.
2. Жирнова Е.А., Банщикова М.Н. Робастное проектирование при изготовлении прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов // Решетневские чтения: материалы XVII Междунар. науч. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, 12-14 ноября 2013 г.). Ч. 1. Красноярск, 2013. С. 411-413.
3. Sloan J. Composites steady radio telescope reflector // CompositesWorld. 2014. No. 7. P. 36-45.
4. Голушко С.К., Юрченко А.В. Моделирование поведения главного зеркала композитной параболической антенны // Вычислительные технологии. 2001 . Т. 6. Спец. вып. Труды Международной конференции RDAMM - 2001(Rank Difference Analysis of Microarray), ч. 2. С. 750-759.
5. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2003. 368 с.
6. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. СПб.: Профессия, 2010. 224 с.
7. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
8. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC Nastran. М.: ДМК Пресс, 2003. 448 с.
9. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.
10. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В. Оптические измерения: учеб. пособие. М.: Логос, 2007. 416 с.

Composite Technology in Radar Equipment. Dopler Meteo Radar Reflector Device

A.V. Shumov^{1,*}, A.A. Plakhotnichenko¹,
M.V. Titova¹

* shum_ov@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: reflector, glass fiber reinforcement plastics, finite element model, optical measurement, design

The article is devoted features of the application composite materials in radar technology for example adjustment of the development technology of the reflector antenna device DMRL-S - radar for monitoring meteorological conditions.

Russian and foreign analogues DMRL-S are made of aluminum, which no longer meets modern requirements for strength and weight. Also aluminum reflectors are not temperature stable. Composite materials are characterized by higher values of specific characteristics: temporary resistance, endurance limit, stiffness, elastic modulus, and less prone to cracking. The use of such materials improves the strength, rigidity and durability.

For the manufacture of the DMRL-C reflector used composite materials based on epoxy resins reinforced with fiberglass (both unidirectional and woven). To increase the rigidity and weight reflector is made in the form of three-layer sandwich fiberglass panels with honeycomb core variable height. Design work was carried out in a CAD Siemens NX8.0 / Unigraphics, through which was established mathematical model layered reflector, as well as all accessories used in the manufacture. With the program NX Nastran was held strength calculation and analysis of stiffness on the finite element method.

After the manufacture of the product, we measured the standard deviation of the working surface of the reflector from the theoretical surface using a three-dimensional laser scanner. Measurements were made at different angular positions of the reflector, and when loading. It is shown that the maximum strain in the operating modes of operation across the surface of the product does not exceed 4%, which will provide the most accurate operation of the product in any position of the antenna system.

As a result of this work reflector design was developed, created and verified by experimental data calculation model. Reflector antenna device of the DMRL-S was manufactured and tested. The reflector was made of reinforced polymer composite materials and had significantly better performance than its competitors.

References

1. Banshchikova M.N., Zhirnova E.A. Improved technology of manufacturing products from polymeric composite materials based on analysis of the kinetics processes. *Reshetnevskie chteniya: materialy 18 Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. 90-letiyu so dnya rozhdeniya gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M.F. Reshetneva* [Proc. of the 18 International Scientific Conference “RESHETNEV READINGS” dedicated to the 90th anniversary since the birth of Mikhail Reshetnev, an outstanding scientist, chief-constructor of space-rocket systems and communication satellites]. Krasnoyarsk, 11-14 November, 2014. Vol. 1. Krasnoyarsk, 2014, pp. 382-383. (in Russian).
2. Zhirnova E.A., Banshchikova M.N. Robust design to manufacture precision reflector antenna of polymer composites. *Reshetnevskie chteniya: materialy 17 Mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoy pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva* [Proc. of the 17 International Scientific Conference “RESHETNEV READINGS” dedicated to the memory of Mikhail Reshetnev]. Krasnoyarsk, 12-14 November, 2013. Vol. 1. Krasnoyarsk, 2013, pp. 411-413. (in Russian).
3. Sloan J. Composites steady radio telescope reflector. *CompositesWorld*, 2014, no. 7, pp. 36-45.
4. Golushko S.K., Yurchenko A.V. Behavioral modeling of composite parabolic antenna. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2001. T. 6, spec. iss. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii RDAMM - 2001* [Proc. of International Conference “Rank Difference Analysis of Microarray - 2001”], part 2, pp. 750-759. (in Russian).
5. Gurtovnik I.G., Sokolov V.I., Trofimov N.N., Shalgunov S.I. *Radioprozrachnye izdeliya iz stekloplastikov* [Radioparent fiberglass products]. Moscow, Mir Publ., 2003. 368 p. (in Russian).
6. Shevchenko A.A. *Fizikokhimiya i mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Physical chemistry and mechanics of composite materials]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2010. 224 p. (in Russian).
7. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite Materials – Engineering and Science*. Elsevier, 1999. (Russ. ed.: Matthews F.L., Rawlings R.D. *Kompozitnye materialy. Mekhanika i tekhnologiya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 408 p.) .
8. Shimkovich D.G. *Raschet konstruktsiy v MSC Nastran* [Structural analysis in MSC Nastran]. Moscow, DMK Press, 2003. 448 p. (in Russian).
9. Rychkov S.P. *Modelirovanie konstruktsiy v srede Femap with NX Nastran* [Modeling structures in Femap with NX Nastran]. Moscow, DMK Press, 2013. 784 p. (in Russian).
10. Andreev A.N., Gavrilov E.V. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2007. 416 p. (in Russian).