

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. В. Москвичев, А. М. Лепихин, А. Е. Буров ✉,
С. В. Доронин, Е. В. Москвичев

*Институт вычислительных технологий СО РАН,
г. Красноярск, Российская Федерация*

Современные полимерные композиционные материалы, обладающие высокими удельными характеристиками прочности и жесткости, позволяют создавать прочные, долговечные и геометрически стабильные космические конструкции. Для расширения сфер использования композиционных материалов и повышения конкурентоспособности космических конструкций необходимо дальнейшее совершенствование методов проектирования с широким использованием методов многомасштабного вычислительного моделирования процессов деформирования и разрушения. В работе представлены результаты анализа прочности и размерной стабильности конструкций из полимерных композиционных материалов. Рассматриваются металлокомпозитный бак высокого давления для электрореактивных двигательных установок и конструкции прецизионных рефлекторов антенн космического и наземного базирования. Изложены методики и результаты экспериментальных и расчетных исследований напряженно-деформированных и предельных состояний конструкций. Описаны методы и средства неразрушающего контроля, результаты анализа напряженно-деформированного состояния и натурных испытаний конструкции бака. Даны обобщенные оценки несущей способности конструкций рефлекторов в заданных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: композиционные конструкции, прочность, ресурс, экспериментальные исследования, численный анализ, напряженно-деформированное состояние.

Введение

В конструкциях космических аппаратов все более широкое применение получают полимерные композиционные материалы (ПКМ). Основным достоинством ПКМ является то, что они обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, стабильностью геометрических размеров, коррозионной стойкостью и стойкостью к воздействию факторов космического пространства. Существующие технологии позволяют получать композиционные и металлокомпозитные конструкции и изделия сложной формы с высокими рабочими характеристиками. В то же время конструкции из ПКМ имеют существенную неоднородность структуры и физико-механических свойств компонентов. Данные факторы оказывают существенное влия-

ние на процессы зарождения и накопления повреждений ПКМ, что приводит к снижению прочности, жесткости и размерной стабильности конструкций. Для оценки роли неоднородности требуется решение сложных расчетно-экспериментальных задач анализа напряженно-деформированных состояний, характера и уровней поврежденности, условий наступления. В данной статье представлен методический подход к решению указанных задач на примере конструкций металлокомпозитного бака высокого давления и рефлекторов космических и наземных антенн, разрабатываемых и используемых в АО «ИСС». Исследования выполнялись в рамках проектов Федеральных целевых программ «Разработка научно-методической базы и технологий обеспечения качества, надежности и безопасности металлокомпозитных баков высокого давления для перспективных электрореактивных двигателей космических аппаратов» и «Расчетно-экспериментальные исследования механики деформирования, предельных состояний и надежно-

✉ aeburov@ict.nsc.ru

© Москвичев В. В., Лепихин А. М., Буров А. Е., Доронин С. В., Москвичев Е. В., 2019

сти конструкций рефлекторов наземных и космических антенн из интеллектуальных полимерных композиционных материалов».

1. Анализ прочности и предельных состояний металлокомпозитного бака высокого давления

Металлокомпозитный бак высокого давления (МКБВД) используется в электрореактивных двигательных установках космических аппаратов и предназначен для хранения рабочего тела (ксенона) при давлениях свыше 7,8 МПа. Конструкция МКБВД представляет собой осесимметричную эллипсоидную оболочку вращения, состоящую из тонкостенного металлического сосуда (лейнера) и композитной оболочки (рис. 1). Лейнер представляет собой тонкостенную сварную емкость из титанового сплава ВТ1-0, состоящую из двух днщ переменной толщины на подкладном кольце и фланцев. Оболочка изготавливается методом непрерывной намотки на лейнер пакетов угольных волокон ISM60, пропитанных связующим ЭД-И ТУ ВЗ-774-2010 [1; 2]. Цель исследований МКБВД заключалась в анализе научных, конструкторских и технологических проблем, обосновании и решении теоретических, расчетных и экспериментальных задач обеспечения прочности, надежности и безопасности конструкции. Комплекс исследовательских задач включал расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) и предельных состояний (ПС), разработку моделей деформирования и разрушения, определение характеристик механических свойств конструкционных материалов, критических давлений нарушения герметичности и разрушений МКБВД, оценку фактических коэффициентов запасов прочности бака.

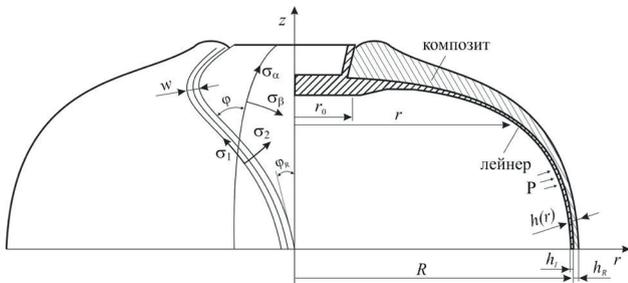


Рис. 1. Комбинированная оболочка вращения, полученная методом непрерывной намотки

Для исследования особенностей деформирования и разрушения МКБВД были проведены уникальные пневматические испытания баков с проведением визуального, измерительного и акустико-эмиссионного (АЭ) контроля их состояния, вплоть до момента разрушения [3]. Методика экспериментальных исследований включала испытания

на прочность до разрушения при кратковременном статическом нагружении и ресурсные испытания при длительном статическом и циклическом нагружении. Было испытано 15 образцов МКБВД до разрушения, 1 образец при длительном статическом нагружении и 1 образец при циклическом нагружении. Испытания проводились с использованием специально разработанных испытательных стендов (рис. 2).



(а)



(б)

Рис. 2. Общий вид МКБВД перед испытаниями: а – в бункере для испытаний до разрушения; б – в боксе для испытаний на длительную прочность

Испытания на прочность до разрушения

Результаты испытаний на прочность до разрушения позволили установить виды ПС, механизмы и условия их достижения [3; 4]. ПС в виде нарушения герметичности обусловлено разрушением сварных соединений расходного фланца с дном лейнера. Металлографическими исследованиями было установлено, что разрушение соединений произошло по механизму истощения прочностных свойств металла зоны термического влияния. С учетом этого были проведены изменения конструкции фланцев и силовой оболочки, что позволило существенно повысить жесткость и прочность баков. В результате удалось исключить по-

терю герметичности и обеспечить достижение ПС в виде полного разрушения МКБВД при нагрузках, существенно превышающих расчетные уровни.

Анализ данных АЭ контроля МКБВД в процессе испытаний показал, что при давлении свыше 0,5 от рабочего давления ($P_{раб}$) фиксируется нарастающее число АЭ источников от датчиков на композитной оболочке [5]. При давлении выше $P_{раб}$ отмечаются АЭ сигналы, обусловленные растрескиванием матрицы и скольжением слоев композитной оболочки. В диапазоне давлений (1,5–1,7) $P_{раб}$ были выявлены критические источники АЭ III класса, связанные с процессами разрушения волокон композита и формированием локальных кластеров повреждений. При дальнейшем повышении давления (свыше $2P_{раб}$) фиксировались катастрофические источники АЭ IV класса, обусловленные процессами развития очаговых повреждений с множественными разрывами волокон. За несколько секунд до разрушения отмечался резкий рост суммарной активности по каналу АЭ датчика на фланце лейнера. Наиболее вероятным источником такой активности можно считать процесс разрушения лейнера.

Помимо испытаний МКБВД были проведены гидравлические испытания лейнера на прочность. Разрушение лейнера произошло в зоне максимальных напряжений в области фланца. Полученное давление разрушения (20 МПа) свидетельствует о существенном запасе прочности конструкции лейнера.

Результаты испытаний на длительную прочность

Испытания на длительную прочность проводились в течение 2-х лет в два этапа. На первом этапе МКБВД был нагружен до $P_{раб}$ и выдерживался при этом давлении в течение года. На втором этапе бак был «догружен» до давления $1,25P_{раб}$ и выдерживался при этом давлении в течение еще одного года. Испытания проводились в специальной камере с контролируемыми и автоматически поддерживаемыми параметрами внешней среды и давления в баке. В процессе нагружения и выдержки МКБВД под давлением проводился контроль герметичности, АЭ-контроль, измерения перемещений, тензометрирование для оценки напряженно-деформированного состояния.

Анализ результатов испытаний показал, что существенных изменений напряженно-деформированного состояния не наблюдается. Инструментальными средствами и акустико-эмиссионным контролем не зафиксированы процессы нарушения герметичности и развития повреждений в материале МКБВД. Результаты тензометрирования свидетельствуют о незначительном перераспределении и релаксации напряжений в композитной оболочке. Таким образом, каких-ли-

бо существенных тенденций, явно свидетельствующих о развивающихся процессах ползучести конструкции, не отмечено. Фиксируемый уровень деформаций в целом соответствует результатам расчетов [3; 4].

Результаты циклических испытаний

Испытания проводились на одном МКБВД в течение 82 циклов нагружения (принят 4-х кратный запас по числу циклов). В течение 70 циклов нагружения были выявлены незначительные изменения деформаций, указывающие на перераспределение напряжений в композиционном материале. При дальнейших циклах нагружения каких-либо тенденций в изменениях деформаций не наблюдалось. АЭ контроль МКБВД не выявил каких-либо существенных источников АЭ. Визуально-измерительным контролем бака после испытаний дефектов и повреждений конструкции не обнаружено.

Проведенные после циклического нагружения испытания бака на прочность с АЭ контролем до давления $2P_{раб}$ показали отсутствие критических источников акустической эмиссии. На основании этого можно заключить, что предусмотренные конструкторской документацией циклические нагружения бака при технологических испытаниях не приводят к значимым процессам накопления повреждений и снижению прочности конструкции.

Численный анализ напряженно-деформированного состояния

Основная цель численного анализа заключалась в выявлении особенностей деформирования, накопления повреждений и разрушения МКБВД. Конечно-элементная модель представляла циклически повторяющийся 30° сегмент конструкции МКБВД, включающий герметизирующий лейнер и силовую композитную оболочку (рис. 3а).

С использованием разработанной модели были исследованы особенности прогрессирующего разрушения волокнистого композиционного материала оболочки бака [6–9]. Результаты моделирования накопления повреждений в композитной оболочке при возрастании давления представлены на рис. 3б. Результаты показывают, что разрушение композитной оболочки начинается с растрескивания связующего в области полностью утолщения. По мере увеличения нагрузки зоны повреждений матрицы распространяются в направлении экватора. При достижении критического уровня деформаций возникают повреждения в виде обрывов волокон. Накопление указанных повреждений приводит к снижению жесткости композитной оболочки, что проявляется в увеличении перемещений в осевом направлении и появлении пластических деформаций в лейнере. Дальнейшее накопление повреждений приводит к достижению

одного из указанных выше предельных состояний МКБВД. Указанные результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами испытаний натуральных образцов баков.

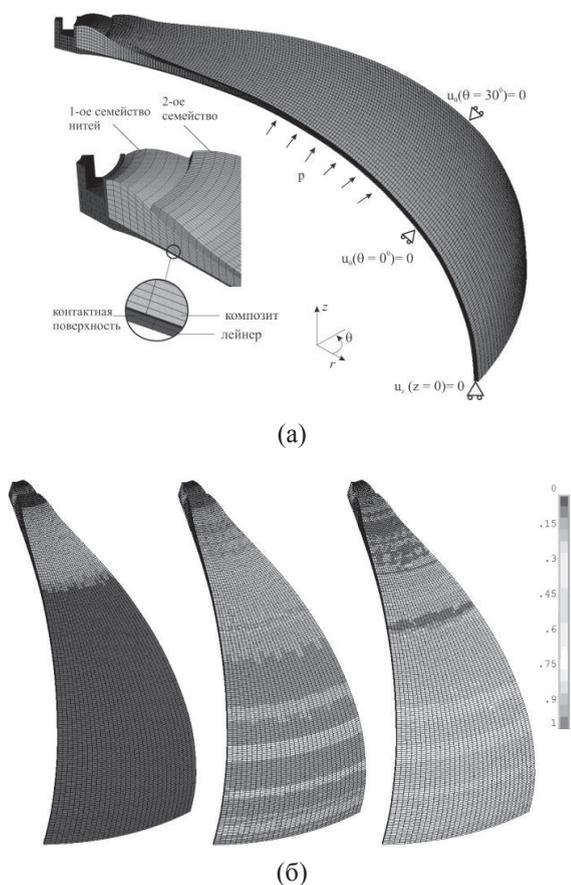


Рис. 3. Численная модель (а) и результаты моделирования эволюции повреждений композитной оболочки (б)

Выполненный комплекс расчетно-экспериментальных исследований МКБВД позволил сделать вывод о том, что разработанный МКБВД удовлетворяет заданным техническим требованиям и может быть использован в космических аппаратах с длительными сроками активного существования на орбите.

2. Анализ прочности композиционных конструкций прецизионных рефлекторов

В связи с развитием космической связи и навигации проектируются и исследуются перспективные прецизионные антенные рефлекторы из ПКМ. При этом возникают задачи обеспечения их геометрической стабильности в условиях длительного воздействия факторов космического пространства. В данном разделе представлены результаты исследований прочности и геометрической стабильности двух рефлекторов: прецизионного крупногабаритного рефлектора зеркаль-

ных антенн наземных систем связи (Изделие 1) и прецизионного трансформируемого рефлектора космических антенн (Изделие 2), создаваемых в АО «ИСС». Исследования выполнялись методами численного моделирования напряженно-деформированных и предельных состояний конструкций при заданных нагрузках и воздействиях [10–13].

Изделие 1 представляет собой крупногабаритный рефлектор зеркальной антенны диаметром до 12 м наземных систем связи нового поколения. Условия эксплуатации соответствуют группе 1.10 ГОСТ РВ 20.39.304-98. Характеристиками предельного состояния считаются деформация или повреждение силового каркаса или сегментов, неустраняемые в эксплуатирующих организациях, и повреждение целостности внешнего покрытия сегментов. Условием отказа является превышение среднеквадратического отклонения (СКО) геометрии рабочей поверхности зеркала от теоретического профиля более 3 мм при равномерно распределенной ветровой нагрузке до 20 м/с.

Цель работ по Изделию 1 заключалась в исследовании напряженно-деформированных и предельных состояний и проведении оптимизации конструктивных решений. Для реализации этой цели были решены следующие задачи [10–18]:

- задача стационарной теплопроводности и термоупругости для исследования напряженно-деформированных состояний сегментов зеркала в условиях радиационно-конвективного теплообмена;
- задача внешней аэродинамики и упругого деформирования для напряженно-деформированных состояний сегментов зеркала и силового каркаса;
- анализ собственных частот и форм колебаний отдельных сегментов зеркала и рефлектора в сборе;
- численное моделирование напряженно-деформированного состояния конструкции при действии воздушного потока со скоростью 55 м/с, синусоидальной вибрации с амплитудой ускорений 40 м/с² в диапазоне частот от 1 до 80 Гц, акустического шума с амплитудой уровня звукового давления 100 дБ в диапазоне частот от 50 до 10000 Гц, механического удара одиночного действия с пиковым ударным ускорением 1000 м/с² и длительностью действия ударного ускорения 1 мс и 5 мс;
- исследование живучести типовых соединительных узлов силового каркаса.

Результаты исследований позволили определить поля напряжений и деформаций при рабочих нагрузках и воздействиях (рис. 4 и 5). Были определены амплитудно-частотные характеристики Изделия 1 (рис. 6) и напряженное состояние при ударных воздействиях (рис. 7).

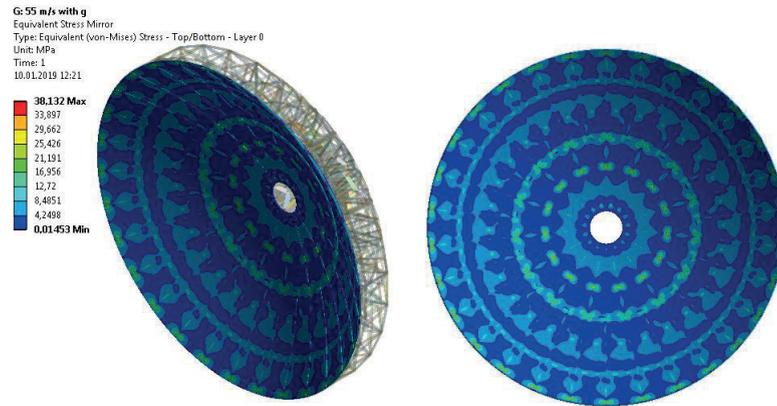


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в сегментах зеркала при действии воздушного потока со скоростью 55 м/с

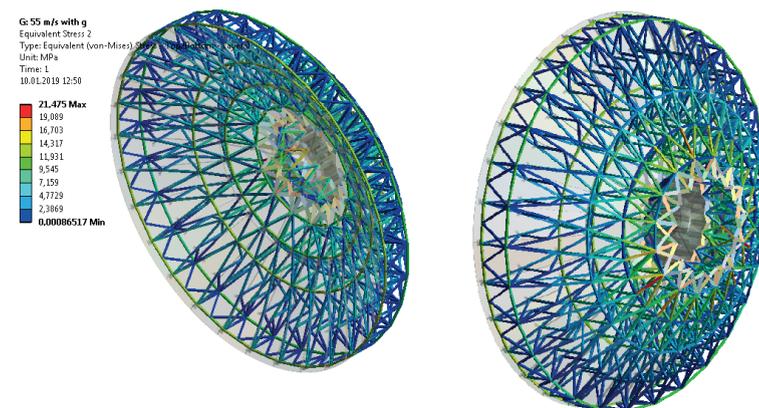


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в стержнях каркаса при действии воздушного потока со скоростью 55 м/с

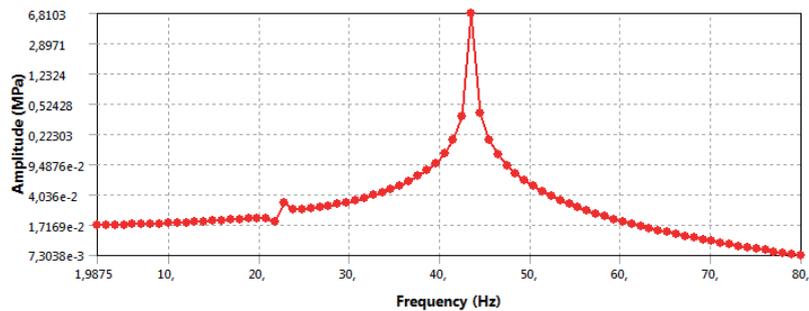


Рис. 6. Характерные расчетные амплитудно-частотные характеристики нормальных напряжений

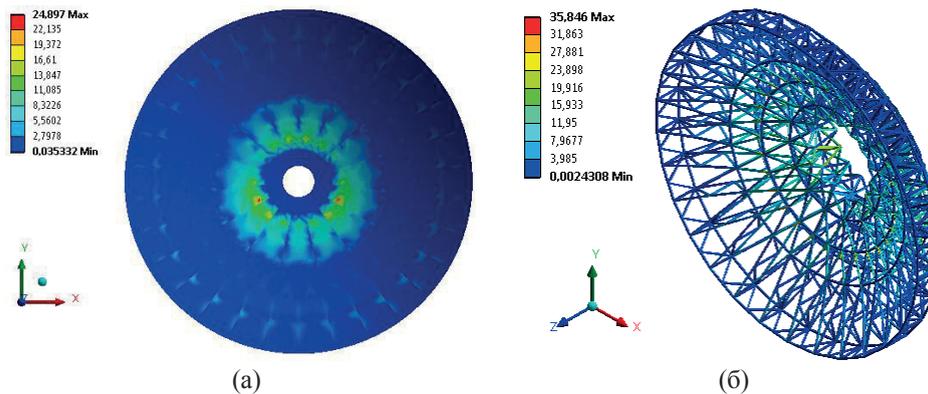


Рис. 7. Характерное распределение эквивалентных напряжений в сегментах зеркала (а) и силовом каркасе (б) при действии механического удара одиночного действия длительностью $\tau = 5$ мс

На основании решения указанных задач были установлены зависимости характеристик геометрической стабильности, прочности, устойчивости структурных элементов от скорости, азимута и угла места действия ветровой нагрузки, а также температурных условий работы рефлектора [10–18]. Выполнен анализ предельных состояний и проведено обоснование предельных нагрузок и коэффициентов запаса прочности. Получена общая характеристика работоспособности рефлектора в заданных условиях эксплуатации. Выполненный комплекс задач расчетного анализа показал соответствие конструкции техническим требованиям по условиям прочности и стабильности формы.

Изделие 2 представляет собой прецизионный крупногабаритный трансформируемый осесимметричный параболический рефлектор диаметром до 5 м. В качестве силовой схемы рефлектора использована зонтичная конструкция с шарнирно закрепленными спицами из композитного материала на основе углепластика. Условия эксплуатации соответствуют группе 5.4 ГОСТ РВ 20.39.304–98. Предельным состоянием является превышение СКО геометрии рабочей поверхности от теоретического профиля более 0,3 мм. Отказом является превышение СКО геометрии рабочей поверхности от теоретического профиля более 0,5 мм.

Цель работ по Изделию 2 заключалась в исследовании особенностей напряженно-деформированного состояния и предельных состояний. Были поставлены и решены следующие задачи [16–19]:

- проведены испытания по определению физико-механических свойств используемых композиционных материалов в рабочем диапазоне температур от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- проведены испытания по определению функциональных свойств композиционного материала с памятью формы и определены технологические параметры шпангоута, оптимальные для его активации;
- проведены исследования геометрической стабильности рефлектора при внешних механических и температурных воздействиях;

- проведены исследования статической и динамической прочности рефлектора, включая расчет напряженно-деформированного состояния, определение собственных частот и форм колебаний;

- выполнен анализ предельных состояний рефлектора, определены их критерии и обоснованы коэффициенты запаса;

- выполнены прогнозные оценки ресурса и параметров надежности, установленных техническими требованиями;

- на основе исследований геометрической стабильности обоснованы предложения по оптимизации конструкции рефлектора;

- проведен численный кинематический анализ рефлектора, определены законы движения звеньев кинематической модели при раскрытии антенны;

- разработаны рекомендации по обеспечению прочности формообразующей;

- определен и обоснован перечень конструктивных элементов, подлежащих макетированию.

Результаты расчетной оценки статической и динамической прочности рефлектора при заданных характеристиках механических свойств ПКМ и проектных нагрузках приведены на рис. 8. Выполнен расчет СКО от заданного профиля отражающей поверхности рефлектора для случаев раскрытия при наземных испытаниях и раскрытия в условиях космического пространства.

Был выполнен модальный расчет и расчет собственных частот и форм колебаний. Проведены прочностные расчеты при действии линейного ускорения, акустического шума, одиночного удара, синусоидальной и случайной вибрации. Результаты показали, что при заданных нагрузках и воздействиях расчетные напряжения не превышают экспериментальных пределов прочности для применяемых композиционных материалов с учетом коэффициентов безопасности.

Исследования геометрической стабильности рефлектора при температурных воздействиях в условиях космического пространства в диапазо-

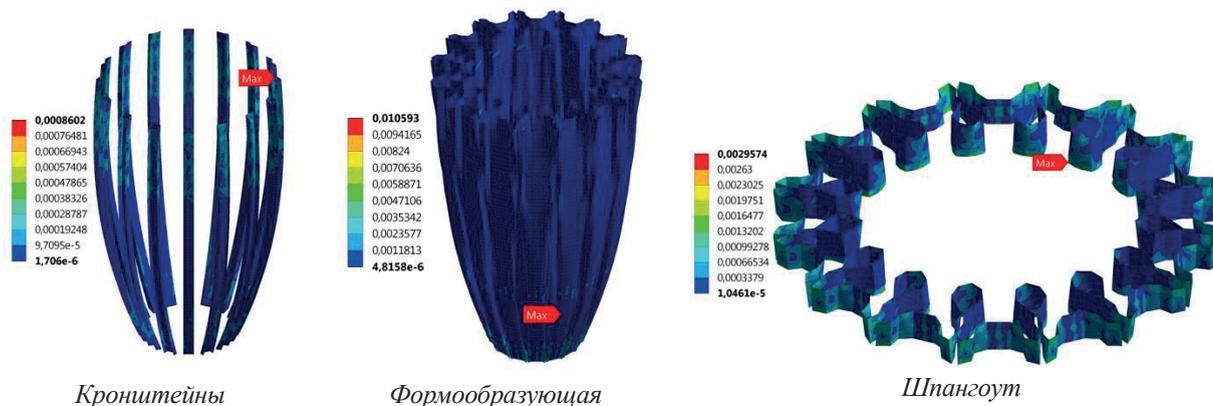


Рис. 8. Эквивалентные напряжения в элементах конструкции космического рефлектора при действии синусоидальной вибрации, МПа

не температур от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ показали, что СКО составляет $0,113\text{ мм}$ при температуре $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,186\text{ мм}$ при температуре $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. С учетом изложенного можно заключить, что Изделие 2 в целом соответствует техническим требованиям по условиям прочности и стабильности формы.

Заключение

Современные ПКМ, обладающие высокими удельными характеристиками прочности и жесткости, позволяют создавать прочные, долговечные и геометрически стабильные космические конструкции. Для расширения сфер использования композиционных материалов и повышения конкурентоспособности космических конструкций необходимо дальнейшее совершенствование ме-

тодов проектирования с широким использованием методов многомасштабного вычислительного моделирования процессов деформирования и разрушения. Представленные результаты показывают перспективность и реализуемость такого подхода. Разработка адекватных многомасштабных вычислительных моделей, в сочетании с методами физического моделирования и неразрушающего контроля, обеспечивает возможности для существенного повышения эксплуатационных характеристик композитных конструкций. Помимо этого создаются условия для создания цифровых двойников конструкций и разработки методов виртуальных испытаний. На этой основе возможно повышение достоверности и сокращения сроков стендовых и натуральных испытаний конструкций космического назначения.

Список литературы

- [1] Vasiliev V. V. Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. Blacksburg, VA : Bull Ridge Publishing, 2009. 690 p.
- [2] Азаров А. В., Бабичев А. А., Синьковский Ф. К. Проектирование и изготовление композитного бака высокого давления для космического аппарата // Композиты и наноструктуры. 2013. № 4. С. 44–57.
- [3] Лепихин А. М., Москвичев В. В., Черняев А. П., Похабов Ю. П., Халиманович В. И. Экспериментальная оценка прочности и герметичности металлокомпозитных сосудов высокого давления // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 6. С. 30–36.
- [4] Лепихин А. М., Москвичев В. В., Буров А. Е., Анискович Е. В., Черняев А. П., Халиманович В. И. Экспериментальные исследования прочности и ресурса металлокомпозитных баков высокого давления // Заводская лаборатория. Диагностика металлов. 2019. Т. 85. № 1. С. 49–56.
- [5] Lepikhin A. M., Moskvichev V. V., Chernyaev A. P. Acoustic-Emission Monitoring of the Deformation and Fracture of Metal-Composite Pressure Vessels // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2018, vol. 59, issue 3, pp. 511–518.
- [6] Lepikhin A. M., Burov A. E., Moskvichev V. V. Possibilities of the design estimates of the reliability of a high-pressure metal-composite tank // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2015, vol. 44, issue 4, pp. 344–349.
- [7] Burov A. E., Lepikhin A. M. Numerical simulation of carrying capacity of the high-pressure metal composite vessel // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, vol. 45, issue 5, pp. 443–450.
- [8] Амелина Е. В., Буров А. Е., Голушко С. К., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Юрченко А. В. Расчетно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 5. С. 3–21.
- [9] Burov A. E., Lepihin A. M., Makhutov N. A., Moskvichev V. V. Numerical Analysis of Stress-Strain State and Strength of Metal Lined Composite Overwrapped Pressure Vessel // Strength of Materials, 2017, vol. 49, issue 5, pp. 666–675.
- [10] Doronin S. V., Moskvichev V. V. Decomposition of design analysis problems of precision structures of large reflectors // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 28–34.
- [11] Doronin S. V. Projections of Limiting States for Load-Bearing Structures of Reflectors Made of Polymer Composites // AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1915, issue 1, 040008.
- [12] Doronin S. V., Reizmunt E. M., Filippova Y. F. Design Evaluation of Safety Factors for Reflector Skeleton Made of Polymer Composites // AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1915, 040009.
- [13] Doronin S. V., Rogalev A. N. Numerical approach and expert estimation of multi-criteria optimization of precision constructions // CEUR Workshop Proceedings, 2018, vol. 2098, pp. 323–337.
- [14] Doronin S. V., Reizmunt E. M. Investigation of free oscillations for reasoning constructive decisions of mirror segments of parabolic antenna // Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1050, issue 1, 012021.
- [15] Reizmunt E. M., Doronin S. V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1050, issue 1, 012069.
- [16] Lepikhin A. M., Burov A. E., Pokhabov Y. P. Estimation of the failure-free operation for deployment of transformable space structures // Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1050, 012042.

- [17] Moskvicev E. V., Khakhlenkova A. A. Analyzing the Surface Accuracy of a Rigid Reflector under Mechanical and Thermal Loading // AIP Conference Proceedings, 2017, vol. 1915, 040041.
- [18] Burov A. E., Burova O. G. Multiscale Modelling the Deformation and Failure of Composite Structures // AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 2053, 040013.
- [19] Moskvicev E. V., Larichkin A. Y. Experimental studies on the mechanical properties of a woven composite material for space antenna reflector // Journal of Physics: Conference Series, 2018, vol. 1050, 012056.

CALCULATION AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE STRENGTH AND LIMIT STATES OF COMPOSITE STRUCTURES FOR SPACECRAFT

**V. V. Moskvicev, A. M. Lepikhin, A. E. Burov,
S. V. Doronin, E. V. Moskvicev**

*Institute of Computational Technologies of SB RAS,
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Modern polymer composite materials with high specific characteristics of strength and stiffness allow creating strong, durable and geometrically stable space structures. To expand the scope of application of composite materials and increase the competitiveness of space structures, it is necessary to further improve design methods with the widespread use of multiscale computational modeling of deformation and fracture processes. The paper presents the results of analysis on the strength and dimensional stability of structures made of polymer composites. A metal-composite high-pressure tank for electric propulsion systems and the design of precision reflectors for space- and ground-based antennas are considered. The methods and results of experimental and computational studies on the stress-strain and ultimate states of structures are described. The methods and means of non-destructive testing, the results of the analysis on the stress-strain state and full-scale tests of the tank structure are described. Generalized estimates of the load-carrying capacity of reflector structures under given operating conditions are given.

*Keywords: composite structures, strength, service life, experimental investigations,
numerical analysis, stress-strain state.*

References

- [1] Vasiliev V. V. Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing. Blacksburg, VA : Bull Ridge Publishing, 2009. 690 p.
- [2] Azarov A. V., Babichev A. A., Sin'kovskiy F. K. *Proyektirovaniye i izgotovleniye kompozitnogo baka vysokogo davleniya dlya kosmicheskogo apparata* [Design and manufacture of a composite high-pressure tank for a spacecraft] // Composites and Nanostructures, 2013, no. 4, pp. 44–57. (In Russian)
- [3] Lepikhin A. M., Moskvicev V. V., Chernyayev A. P., Pokhabov Yu. P., Khalimanovich V. I. *Eksperimental'naya otsenka prochnosti i germetichnosti metallokompozitnykh sosudov vysokogo davleniya* [Experimental evaluation of the strength and tightness of metal composite pressure vessels] // Deformatsiya i razrusheniye materialov, 2015, no. 6, pp. 30–36. (In Russian)
- [4] Lepikhin A. M., Moskvicev V. V., Burov A. E., Aniskovich Ye. V., Chernyayev A. P., Khalimanovich V. I. *Eksperimental'nyye issledovaniya prochnosti i resursa metallokompozitnykh bakov vysokogo davleniya* [Experimental studies of the strength and life of metal composite pressure tanks] // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials, 2019, vol. 85, no. 1, pp. 49–56. (In Russian)
- [5] Lepikhin A. M., Moskvicev V. V., Chernyaev A. P. Acoustic-Emission Monitoring of the Deformation and Fracture of Metal–Composite Pressure Vessels // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2018, vol. 59, issue 3, pp. 511–518.
- [6] Lepikhin A. M., Burov A. E., Moskvicev V. V. Possibilities of the design estimates of the reliability of a high-pressure metal-composite tank // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2015, vol. 44, issue 4, pp. 344–349.
- [7] Burov A. E., Lepikhin A. M. Numerical simulation of carrying capacity of the high-pressure metal composite vessel // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, vol. 45, issue 5, pp. 443–450.
- [8] Amelina E. V., Burov A. E., Golushko S. K., Lepikhin A. M., Moskvicev V. V., Yurchenko A. V. *Raschetno-eksperimental'naya otsenka prochnosti metallokompozitnogo baka vysokogo davleniya* [Calculation and experimen-

tal assessment of the strength of a metal composite high pressure tank] // *Computational Technologies*, 2016, vol. 21, no. 5, pp. 3–21. (In Russian)

- [9] Burov A. E., Lepihin A. M., Makhutov N. A., Moskvichev V. V. Numerical Analysis of Stress-Strain State and Strength of Metal Lined Composite Overwrapped Pressure Vessel // *Strength of Materials*, 2017, vol. 49, issue 5, pp. 666–675.
- [10] Doronin S. V., Moskvichev V. V. Decomposition of design analysis problems of precision structures of large reflectors // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 28–34.
- [11] Doronin S. V. Projections of Limiting States for Load-Bearing Structures of Reflectors Made of Polymer Composites // *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, issue 1, 040008.
- [12] Doronin S. V., Reyzmunt E. M., Filippova Y. F. Design Evaluation of Safety Factors for Reflector Skeleton Made of Polymer Composites // *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, 040009.
- [13] Doronin S. V., Rogalev A. N. Numerical approach and expert estimation of multi-criteria optimization of precision constructions // *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, vol. 2098, pp. 323–337.
- [14] Doronin S. V., Reyzmunt E. M. Investigation of free oscillations for reasoning constructive decisions of mirror segments of parabolic antenna // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050, issue 1, 012021.
- [15] Reyzmunt E. M., Doronin S. V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050, issue 1, 012069.
- [16] Lepikhin A. M., Burov A. E., Pokhabov Yu. P. Estimation of the failure-free operation for deployment of transformable space structures // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050, 012042.
- [17] Moskvichev E. V., Khakhlenkova A. A. Analyzing the Surface Accuracy of a Rigid Reflector under Mechanical and Thermal Loading // *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, 040041.
- [18] Burov A. E., Burova O. G. Multiscale Modelling the Deformation and Failure of Composite Structures // *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2053, 040013.
- [19] Moskvichev E. V., Larichkin A. Y. Experimental studies on the mechanical properties of a woven composite material for space antenna reflector // *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1050, 012056.