

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Москвичев Е.В.¹, Ларичкин А.Ю.²

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск

²Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Полимерные композитные материалы с эффектом памяти формы являются перспективными для создания элементов конструкций космических аппаратов. Их относительно малая плотность, высокие механические и прочностные свойства совместно со способностью восстанавливать ранее заданную форму позволяют реализовывать уникальные технические решения, такие как: элементы разворачиваемой стрелы на спутнике, включатели для разворачивания солнечных батарей, элементы жесткости рефлектора космической антенны, каркас надувного лунного модуля. [1]. Одно из подобных решений применяется в перспективной конструкции прецизионного композитного рефлектора космической антенны, разрабатываемого АО «ИСС» совместно с СибГУ имени М.Ф. Решетнева при участии специалистов СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН [2-4].

Конструкция рефлектора представляет собой тонкую композитную оболочку диаметром 4 м, закрепленную посредством кронштейнов на шестнадцати спицах (рис. 1). По периметру оболочки установлен шпангоут с памятью формы, который при раскрытии рефлектора в транспортное положение активируется путем нагрева и принимает ранее заданную форму. Это позволяет увеличить жесткость оболочки на ее периферии и, как следствие, повысить точность отражающей поверхности рефлектора, что обеспечивает наилучшие показатели качества сигнала.

В качестве материала шпангоута рассматривался трехслойный композитный материал. Слои материала состояли из биаксиальной ткани Ст 12073 на основе углеродных волокон Тогауса Т 300 3К, пропитанной полимерной матрицей Diaplex MP5510. Данная матрица изготовлена на основе полиуретана и обеспечивает необходимый эффект памяти формы. Основные свойства применяемых компонентов представлены в таблице 1.

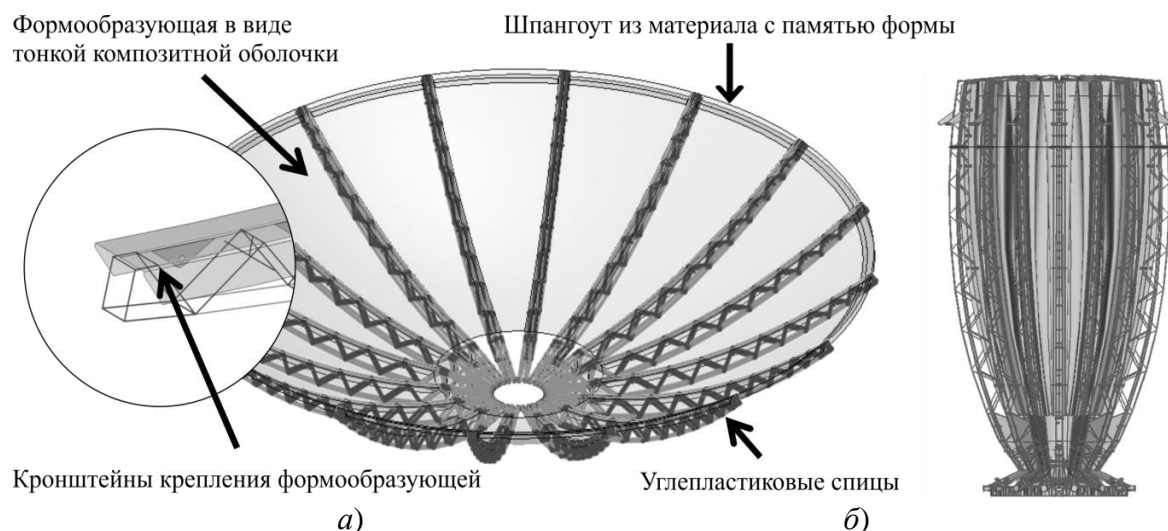


Рис. 1. Конструкция рефлектора космической антенны: рабочее положение (а), транспортное положение (б)

Таблица 1. Свойства компонентов материала шпангоута с памятью формы

Компонент	Плотность, г/см ³	Содержание по объему, %	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Температура стеклования, °С
Углеродное волокно Torayca T 300 3К	1,76	50	230	3530	–
Полимерная матрица Diaplex MP5510	1,21	50	1,80	52	55

Эффект памяти формы в рассматриваемом материале реализуется в процессе поэтапного механического и термического воздействия, суть которого заключается в восстановлении так называемых «замороженных деформаций» после нагрева выше температуры стеклования полимерной матрицы [5].

На первом этапе образец материала формируется методом прямого прессования при нормальной температуре для придания требуемой начальной формы. На втором этапе образец нагревается до температуры выше температуры стеклования полимерной матрицы, деформируется и в деформированном состоянии охлаждается до нормальной температуры, тем самым фиксируя свою временную форму. На третьем этапе образец вновь нагревается до температуры выше температуры стеклования и самопроизвольно восстанавливает начальную форму, которую он имел на первом этапе. На основе данного механизма был разработан принцип работы шпангоута для рефлектора космической антенны, который схематически представлен на рис. 2.

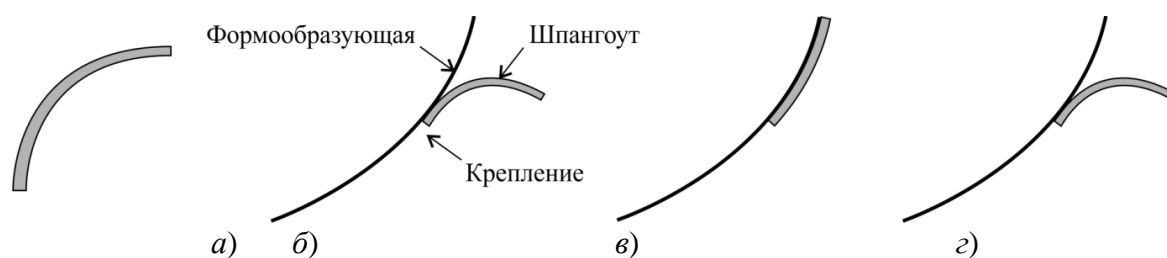


Рис. 2. Принцип работы шпангоута с памятью формы: формирование шпангоута (а), крепление шпангоута к формообразующей (б), фиксация временной формы в транспортном положении (в), восстановление формы в рабочем положении (г)

В целях изучения режимов технологического процесса изготовления шпангоута, а также определения его основных механических свойств были проведены экспериментальные исследования образцов материала шпангоута с памятью формы. Задачей данных исследований являлось определение показателей памяти формы при различной структуре армирования композитного материала, скорости деформирования и времени выдержки в деформированном состоянии. По результатам исследований принималась оптимальная структура армирования материала, для которой определялись модуль упругости и предел прочности при различных температурах.

Для решения данной задачи СибГУ имени М.Ф. Решетнева была разработана программа и методика экспериментальных исследований, которая состояла из следующих этапов:

1. проведение испытаний материала шпангоута на трехточечный изгиб при комнатной температуре для определения предельного прогиба, соответствующего разрушению образца;

2. проведение испытаний материала шпангоута на фиксацию и восстановление формы при трехточечном изгибе для выбора оптимальной структуры армирования материала и скорости деформирования;

3. проведение испытаний материала шпангоута на фиксацию и восстановление формы при трехточечном изгибе при различном времени выдержки в деформированном состоянии (состоянии временной формы);

4. проведение испытаний материала шпангоута на растяжение при температурах минус 50, 20 и 60 °С для определения модуля упругости и предела прочности в различных условиях работы шпангоута.

Испытания по данной программе проводились в Инженерно-испытательном центре СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН и в Институте гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН. Для испытаний на 1 этапе программы применялась универсальная испытательная машина Tinius Olsen 100ST, оборудованная видеоэкстензометром. Для испытаний на 2-4 этапах применялась универсальная испытательная машина Zwick/Roell Z100, оборудованная термокриокамерой, видеоэкстензометром, контактным экстензометром и термомпарами для измерения температуры образцов.

Для испытаний на трехточечный изгиб на этапах 1-3 программы применялись плоские прямоугольные образцы длиной 50 мм, шириной 10 мм и толщиной 0,6 мм. Расстояние между опорами составляло 40 мм, диаметр опор и нагружающего пуансона равнялся 10 мм. Образцы изготовлялись в трех вариантах с различными схемами армирования: [0,0,0], [0,60,-60] и [0,45,-45]. Для испытаний на растяжение на 4 этапе применялись прямоугольные плоские образцы с накладками с длиной рабочей части 50 мм, шириной 16 мм и толщиной 0,6 мм.

По результатам испытаний на 1 этапе был определен предельный прогиб для всех вариантов армирования материала шпангоута. Среднее значение прогиба составило 7,6 мм. Данное значение было принято в качестве нагрузки при испытаниях на этапах 2 и 3. Общая последовательность испытаний на 2 и 3 этапах была следующей:

1. на образцы приклеивались метки для бесконтактной фиксации прогиба посредством видеоэкстензометра;

2. образцы размещались в термокриокамере на опорах для изгиба (по 3 образца за один эксперимент);

3. к образцам подводились термомпары, и проводился нагрев образцов до температуры 70°С, превышающую температуру стеклования матрицы;

4. образцы нагружались в нагретом состоянии на величину прогиба равную 7,6 мм с различной скоростью 1, 5 и 10 мм/сек;

5. под действием нагрузки образцы охлаждались до комнатной температуры;

6. образцы разгружались и выдерживались при комнатной температуре до момента фиксации временной формы;

7. при испытаниях на 3 этапе программы образцы дополнительно выдерживались в состоянии временной формы в течение 24, 48 и 96 часов;

8. образцы нагревались до температуры 70 °С и выдерживались при данной температуре до момента восстановления начальной формы.

В процессе испытаний фиксировались диаграммы «время-прогиб». Одни из полученных диаграмм, соответствующие этапам нагружения, фиксации и восстановления формы представлены на рис. 3.

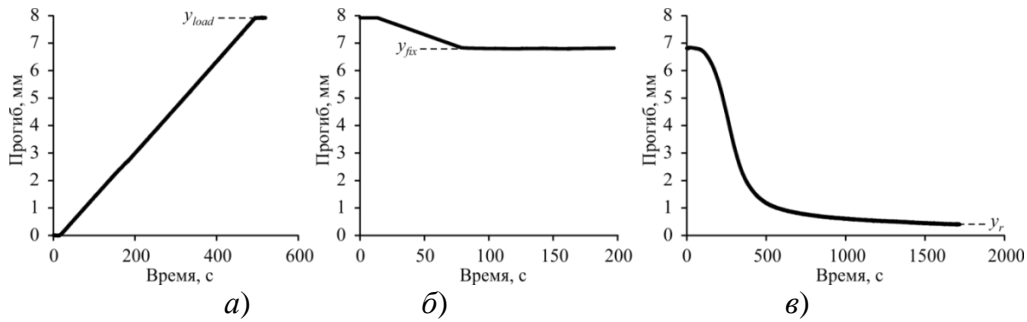


Рис. 3. Диаграммы нагружения (а), фиксации (б) и восстановления (в) формы

По результатам обработки диаграмм определялись степень фиксации формы R_{fix} , степень восстановления формы R_r и скорость восстановления формы v_r по следующим формулам

$$R_{fix} = \frac{y_{fix}}{y_{load}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

$$R_r = \frac{y_{fix} - y_r}{y_{fix}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

$$v_r = \frac{y_{fix} - y_{r90}}{\Delta t_{90}} , \quad (3)$$

где y_{load} – величина прогиба образца при нагружении, мм; y_{fix} – величина прогиба после фиксации временной формы, мм; y_r – величина прогиба после восстановления формы; y_{r90} – величина прогиба, соответствующая 90% восстановленной формы; Δt_{90} – время, затраченное для восстановления 90% формы, с.

Результаты испытаний проведенных на 2 этапе программы представлены на рис. 4.

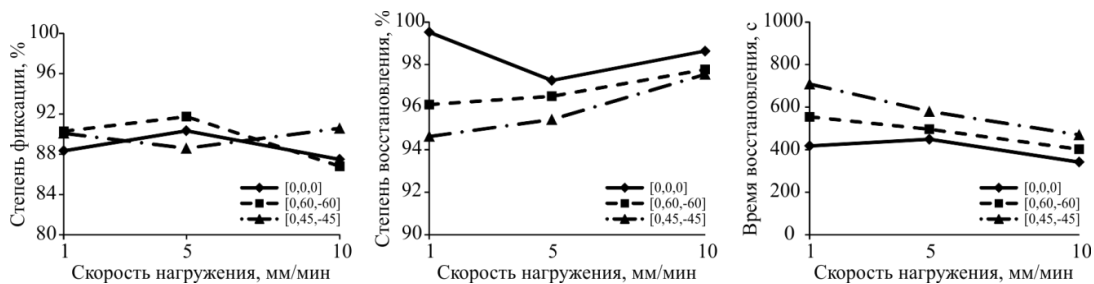


Рис. 4. Результаты 2 этапа испытаний

Анализ результатов показывает, что оптимальными с точки зрения исследуемых параметров памяти формы являются образцы со схемой армирования $[0,0,0]$ при скорости нагружения 1 мм/сек, так как имеют максимальную степень восстановления формы при минимальном времени. При этом степень фиксации формы не имеет выраженной зависимости от скорости нагружения и схемы армирования. Таким образом, материал со схемой армирования $[0,0,0]$ был принят как перспективный для использования в конструкции шпангоута, а образцы из данного материала испытывались на следующих этапах испытаний.

Результаты испытаний на 3 этапе, представленные на рис. 5, в целом не показали выраженной зависимости свойств памяти формы от времени выдержки в деформированном состоянии.

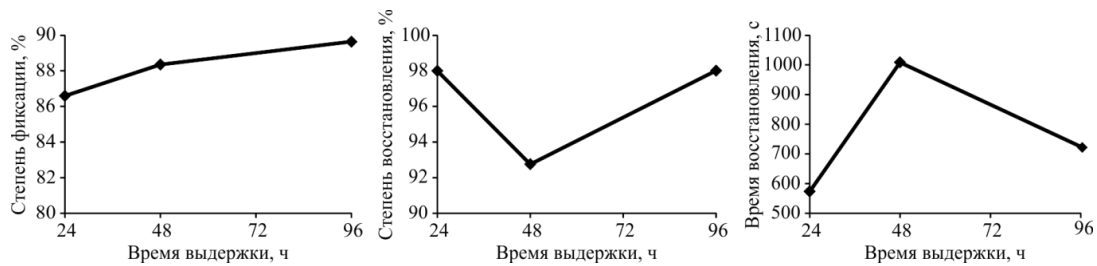


Рис. 5. Результаты 3 этапа испытаний

Результаты заключительного 4 этапа испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства материала шпангоута со схемой армирования [0,0,0] при различной температуре

Температура, °С	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа
-50	54,37	459
20	49,50	349
60	30,06	290

Как показывают результаты, механические свойства материала шпангоута имеют выраженную зависимость от температуры. Модуль упругости и предел прочности достигают максимальных значений при отрицательной температуре и минимальных значений при повышенной. Это обусловлено размягчением матрицы при температурах близких к температуре стеклования или выше, вследствие чего нарушается целостность материала, снижается его жесткость и прочность.

В совокупности проведенные исследования показывают, что рассматриваемый композитный материал шпангоута обладает требуемым эффектом памяти формы. Полученные значения свойств фиксации и восстановления формы позволяют считать данный материал перспективным при схеме армирования волокон [0,0,0]. Однако следует учитывать существенное влияние температуры на механические свойства материала. Для обеспечения стабильности его свойств в условиях космического пространства является целесообразным применять теплоизоляцию в конструкции шпангоута с памятью формы.

Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Министерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147.

Литература

- Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review / Y. Liu, H. Du, L. Liu, J. Leng // *Smart Mater. Struct.* 2014. № 23.
- Голдобина Я.Л., Шальков В.В. Перспективный крупногабаритный трансформируемый рефлектор зонтичного типа // *Решетневские чтения.* 2015. № 19. С. 99-101.
- Аналитическое нелинейное моделирование гибкого обода перспективных рефлекторов космических антенн. К.Г. Охоткин, А.Ю. Власов, Ю.В. Захаров, Б.Д. Аннин // *Прикладная механика и техническая физика.* 2017. Т. 58. № 5. С. 190-200.
- Moskvichev E.V., Khakhlenkova A.A. Surface accuracy analysis of rigid reflector in mechanical and thermal loading // *AIP Conf. Proc.* 2017. № 1915.
- Mather P., Luo X., Rousseau I. Shape Memory Polymer Research // *Annu. Rev. Mater. Res.* 2009. № 39. С. 445-471.