

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-1-51-56>

ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

© Егор Владимирович Москвичев¹, Алексей Юрьевич Ларичкин²¹ Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, д. 53; e-mail: jugr@icm.krasn.ru² Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, д. 15; e-mail: larichking@gmail.com

*Статья поступила 16 января 2019 г. Поступила после доработки 20 марта 2019 г.
Принята к публикации 22 июля 2019 г.*

В рамках научно-технических работ по созданию перспективных конструкций рефлекторов космических антенн проведены экспериментальные исследования полимерного композитного материала с эффектом памяти формы. Исследованный материал состоит из трех слоев углеродной биаксиальной ткани Ст 12073, пропитанных полимерной матрицей Diaplex MP5510 на основе полиуретана. Данный материал предназначен для изготовления шпангоута, применяемого в конструкции прецизионного композитного рефлектора космической антенны. Шпангоут при раскрытии рефлектора в транспортное положение принимает ранее заданную форму посредством нагрева, что позволяет увеличить жесткость облоочки рефлектора на периферии и повысить точность отражающей поверхности. Для изучения функциональных и механических свойств материала шпангоута при его изготовлении и различных режимах работы были проведены испытания образцов с различными схемами армирования: $[0_z]$, $[0/\pm 60]$ и $[0/\pm 45]$. Исследовали степень фиксации, степень восстановления и скорость восстановления формы в зависимости от схемы армирования, скорости деформирования и времени выдержки в деформированном состоянии. Для этого была разработана программа испытаний образцов, которая включала несколько этапов. На первых этапах проводили испытания на фиксацию и восстановление формы при трехточечном изгибе плоских образцов при скоростях деформирования 1,5 и 10 мм/с и времени выдержки в деформированном состоянии в течение 24, 48 и 96 ч. По результатам испытаний материал со схемой армирования $[0_z]$ принят как оптимальный для изготовления шпангоута, поскольку имел максимальные степень и скорость восстановления формы. Для выбранного материала на заключительном этапе исследований определяли модуль упругости и предел прочности при различных температурах эксплуатации шпангоута: -50 , $+20$ и $+60$ °С. Проведенные исследования показали, что исследованный композитный материал обладает требуемым эффектом памяти формы и является перспективным для изготовления шпангоута при условии применения теплоизоляции.

Ключевые слова: композитный материал; память формы; рефлектор; испытания; механические свойства.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FUNCTIONAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SHAPE MEMORY POLYMER COMPOSITES FOR A REFLECTOR OF THE SPACE ANTENNA

© Egor V. Moskvichev¹, Alexey Yu. Larichkin²¹ Institute of Computational Technologies SB RAS, Krasnoyarsk Branch Office, 53, Mira prosp., 660049, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: jugr@icm.krasn.ru² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15, Acad. Lavrentyev prosp., 630090, Novosibirsk, Russia; e-mail: larichking@gmail.com

Received January 16, 2019. Revised March 20, 2019. Accepted July 22, 2019.

Experimental study of the shape memory polymer composite is carried out as a part of scientific and technological work aimed at development of the new promising reflectors for space antenna. The studied material consists of three-layered carbon biaxial fabric St 12073 impregnated with a polyurethane-based Diaplex MP5510 polymer matrix. This material is intended for manufacturing a frame used in the construction of a precise composite reflector of space antenna. When opening the reflector to the transport position, the rim activated by heating recovers a previously specified shape thus increasing the rigidity of the

reflector at the periphery and enhancing the accuracy of the reflecting surface. To study the functional and mechanical properties of the rim material in manufacturing and operating conditions, experimental tests were carried out on the samples with different schemes of reinforcement: $[0_3]$, $[0/\pm 60]$ and $[0/\pm 45]$. The main goal of the study is to determine the degree and rate of the shape recovery, reinforcement angles, deformation rate and exposure time in the strained state. The developed test program included several stages. At the first stages, tests were carried out for fixing and restoring the shape upon three-point bending of flat samples at a strain rate of 1, 5, and 10 mm/sec and exposure of the specimens in deformed state for 24, 48, and 96 h. According to the results the material with the reinforcement angles $[0_3]$ was accepted as optimal for the rim design, as it has maximal shape recovery parameters. For the selected material at the final stage of the study, the elastic modulus and tensile strength were determined at operating temperatures -50 , $+20$, and $+60^\circ\text{C}$. The tests showed that the studied polymer composite material has the desired shape memory properties and is promising for the rim manufacturing provided the heat insulation during operation.

Keywords: composite material; shape memory; reflector; testing; mechanical properties.

Введение

Композитные материалы на основе полимеров с памятью формы находят все большее применение в современной технике [1, 2]. Эти материалы, испытывая большие деформации, способны восстанавливать форму при управляемом активирующем воздействии [3]. Активация эффекта памяти формы для различных типов полимеров с памятью формы может происходить при воздействии температуры, электромагнитного излучения, химического воздействия [4].

В отличие от металлических сплавов с памятью формы, которые имеют высокотемпературную аустенитную и низкотемпературную мартенситную фазы, в полимерах термоактивируемый эффект памяти формы реализуется за счет «замороженных» высокоэластических деформаций. При начальном деформировании в материале запасается упругая энергия, которая высвобождается за счет теплового воздействия при температуре стеклования полимерной матрицы, что приводит к восстановлению исходной формы тела [5].

Благодаря своим свойствам 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 создавать уникальные технические изделия, такие как элементы разворачиваемой стрелы на спутнике, включатели для разворачивания солнечных батарей, элементы жесткости рефлектора космической антенны, каркас надувного лунного модуля [6 – 8]. Одно из них применяется в перспективной конструкции прецизионного композитного рефлектора космической антенны, разрабатываемого АО «ИСС» совместно с СибГУ им. Решетнева при участии специалистов СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН [9 – 11].

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 (рабочее положение) активируется путем нагрева и принимает ранее заданную форму. Это позволяет увеличить жесткость оболочки на ее периферии и, как следствие,

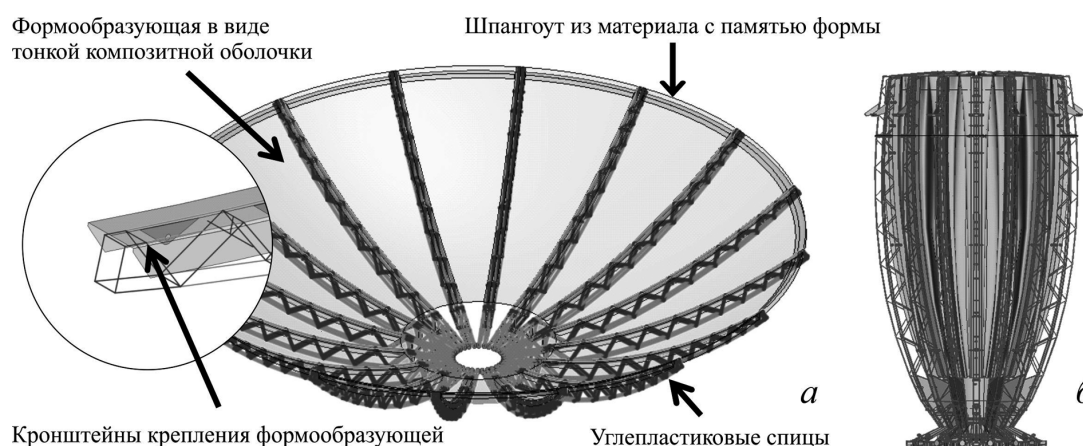


Рис. 1. Конструкция рефлектора космической антенны: а — рабочее положение; б — транспортное положение

Fig. 1. Design of the space antenna reflector: a — operating position; b — transport position

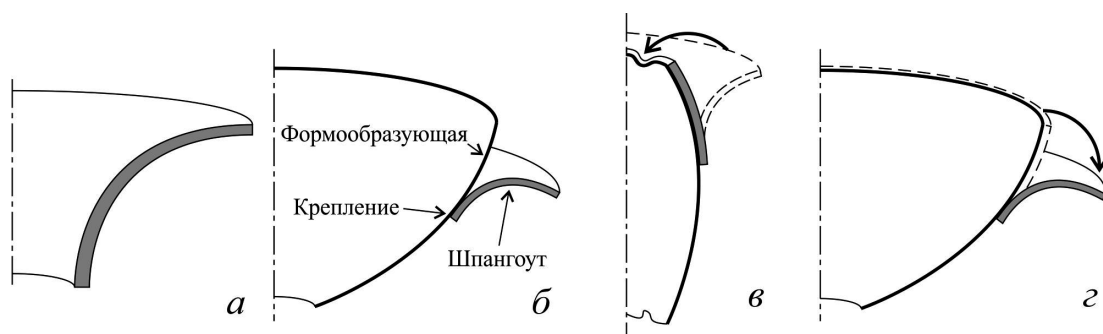


Рис. 2. Принцип работы шпангоута с памятью формы: *а* — формирование шпангоута; *б* — крепление шпангоута к формообразующей; *в* — фиксация временной формы в транспортном положении; *г* — восстановление формы в рабочем положении

Fig. 2. The operating principle of the shape memory rim; *a* — molding of the rim; *b* — mounting to the reflector shell; *c* — fixation of the temporary form in a transport position; *d* — shape recovery in operating position

повысить точность отражающей поверхности рефлектора, что обеспечивает наилучшие показатели качества сигнала.

В качестве материала шпангоута рассматривали трехслойный композит. Слои материала состояли из биаксиальной ткани Ст 12073 на основе углеродных волокон Torayca T 300 3K, пропитанной полимерной матрицей Diaplex MP5510. Данная матрица изготовлена на основе полиуретана и обеспечивает необходимый эффект памяти формы. Основные свойства применяемых компонентов представлены в табл. 1.

Эффект памяти формы в рассматриваемом материале реализуют в процессе поэтапного механического и термического воздействия. На первом этапе изделие из материала формуют методом прямого прессования при нормальной температуре для придания требуемой начальной формы. На втором этапе изделие нагревают до температуры выше температуры стеклования полимерной матрицы, деформируют и в деформированном состоянии охлаждают до нормальной температуры, тем самым фиксируя его временную форму. На третьем этапе изделие вновь нагревают до температуры выше температуры стеклования и восстанавливают начальную форму, которую оно имело на первом этапе. На основе данного механизма разработан принцип работы шпангоута для рефлектора космической антенны, который схематически представлен на рис. 2.

Цель работы и методика исследований

Для изучения функциональных свойств шпангоута при различных режимах работы и технологическом процессе изготовления, а также определения его основных механических свойств были проведены экспериментальные исследования различных образцов материала шпангоута. Задача исследований — установление показателей памяти формы при различных структуре армирования композитного материала, скорости деформирования и времени выдержки в деформированном состоянии. По результатам исследований принимали оптимальную структуру армирования материала, для которой определяли модуль упругости и предел прочности при разных температурах.

Учитывая опыт, представленный в работах [12 – 14], а также принцип и условия работы шпангоута для решения данной задачи, совместно с СибГУ им. Решетнева мы разработали методики экспериментальных исследований, включающие проведение следующих испытаний материала шпангоута:

- 1) на трехточечный изгиб при комнатной температуре для определения предельного прогиба, соответствующего разрушению образца;
- 2) на фиксацию и восстановление формы при трехточечном изгибе для выбора оптимальной структуры армирования материала и скорости деформирования;
- 3) на фиксацию и восстановление формы при трехточечном изгибе при различном времени

Таблица 1. Свойства компонентов материала шпангоута с памятью формы

Table 1. The properties of the components of shape memory material

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

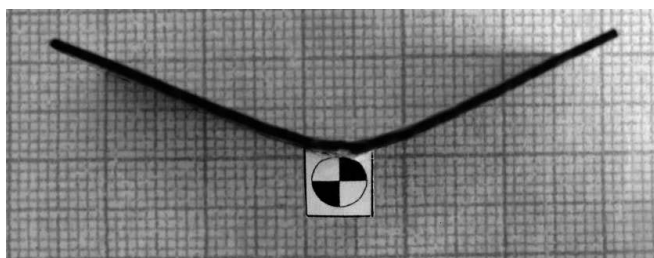


Рис. 3. Образец с меткой после фиксации временной формы

Fig. 3. The specimen with a mark after fixing the temporary form

выдержки в деформированном состоянии (состоянии временной формы);

4) на растяжение при температурах -50 , $+20$ и $+60$ °C для определения модуля упругости и предела прочности в различных условиях работы шпангоута.

Испытания проводили в Инженерно-испытательном центре ИВТ СО РАН и в Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Для испытаний согласно п. 1 применяли универсальную испытательную машину Tinius Olsen 100ST, оборудованную видеоэкстензометром. Для испытаний по пп. 2 – 4 использовали универсальную испытательную машину Zwick/Roell Z100, оборудованную термокриокамерой, видеоэкстензометром, контактным экстензометром и термопарами для измерения температуры образцов.

Применение видеоэкстензометра обусловлено необходимостью измерять прогиб образцов бесконтактным способом ввиду их малых размеров. Для этого перед испытанием на образцы снизу наклеивались контрастные метки диаметром 5 мм (рис. 3). В процессе деформирования проводили видеозапись перемещений меток с обработкой в реальном времени методом корреляции изображений. Суть данного метода заключается в сравнении начального и текущего положений метки на видеокдрах посредством специального программного обеспечения и определении ее смещения [15]. В результате фиксируют вертикальное смещение метки в зависимости от времени и строят диаграмму прогиб — время, которую записывают на жесткий диск компьютера.

Для испытаний на трехточечный изгиб согласно пп. 1 – 3 применяли плоские прямоугольные образцы длиной 50, шириной 10 и толщиной 0,6 мм. Расстояние между опорами составляло 40 мм, радиус закругления опор и нагружающего пуансона 5 мм. Образцы изготавливали в трех вариантах — с различными схемами армирования: $[0_3]$, $[0/\pm 60]$ и $[0/\pm 45]$. Для испытаний на растяжение по п. 4 применяли прямоугольные плоские образцы с накладками с длиной рабочей части 50, шириной 16 и толщиной 0,6 мм.

По результатам испытаний п. 1 был определен предельный прогиб для всех вариантов армирования материала шпангоута. Среднее значение прогиба составило 7,6 мм, оно и было принято в качестве нагрузки при испытаниях по пп. 2 и 3. Нагружение проводили при различных скоростях — 1, 5 и 10 мм/с. Общая последовательность испытаний по пп. 2 и 3 состояла из следующих стадий:

на образцы приклеивали метки для бесконтактной фиксации прогиба посредством видеоэкстензометра;

образцы размещали в термокриокамере на опорах для изгиба;

к образцам подводили термопары, и нагревали образцы до температуры 70 °C, превышающей температуру стеклования матрицы;

образцы нагружали в нагретом состоянии на величину прогиба, равную 7,6 мм, с заданной скоростью;

образцы, находящиеся под нагрузкой, охлаждали до комнатной температуры;

образцы разгружали и выдерживали при комнатной температуре до момента фиксации временной формы;

при испытаниях по п. 3 образцы дополнительно выдерживали в состоянии временной формы в течение 24, 48 и 96 ч;

образцы нагревали до температуры 70 °C и выдерживали при данной температуре до момента восстановления начальной формы.

В процессе испытаний фиксировали диаграммы время — прогиб. Примеры полученных диаграмм, соответствующих этапам нагружения, фиксации и восстановления формы, представлены на рис. 4.

По результатам обработки диаграмм определяли 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} , y_{fix} , y_r — величины прогиба (мм) образца при нагружении, после фиксации временной формы, после восстановления формы соответственно; y_{r90} — величина прогиба, соответствующая 90 % восстановленной формы; Δt_{90} — вре-

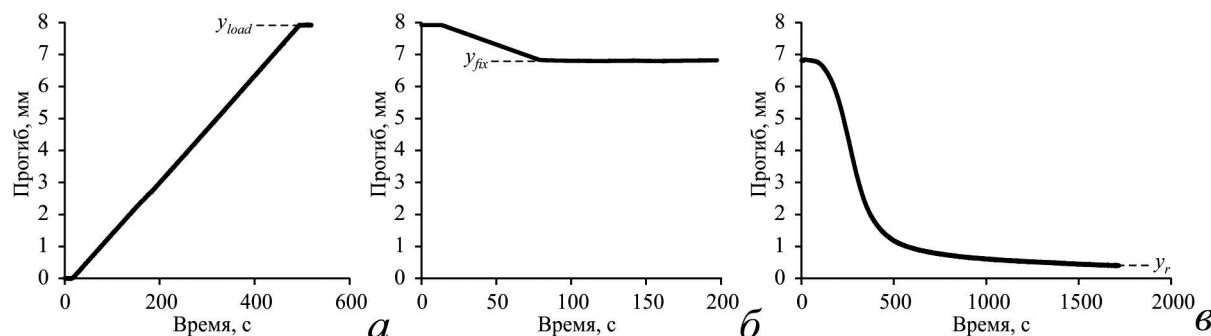


Рис. 4. Диаграммы прогиб — время на стадиях нагружения (а), фиксации формы (б) и восстановления формы (в)

Fig. 4. Deflection vs. time diagrams: a — loading stage; b — shape fixation; c — shape recovery

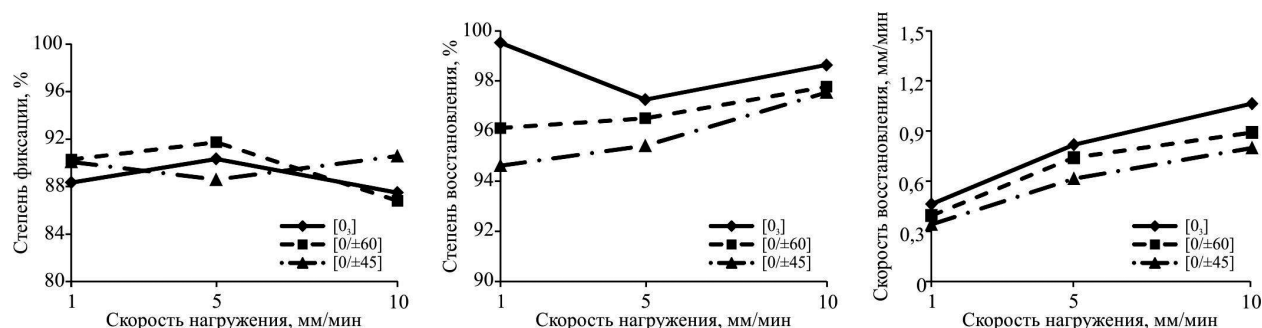


Рис. 5. Обобщенные результаты испытаний

Fig. 5. The summarized results of testing

мя (с), затраченное для восстановления 90 % формы.

Обсуждение результатов

Обобщенные результаты испытаний, проведенных согласно п. 2, представлены на рис. 5. В процессе испытаний было выявлено, что одной из важных является стадия фиксации временной формы. Результаты показывают, что степень фиксации формы не достигает 100 %, а изменяется в диапазоне от 86 до 92 %. Это связано с тем, что усилие, возникающее в образце, значительно изменяется в процессе нагрузки и охлаждения. На рис. 6 представлен пример соответствующей диаграммы усилие — время. Диаграмма показывает, что после начала охлаждения образца усилие со временем возрастает, поскольку внутренние механические и температурные напряжения в образце стремятся вернуть его первоначальную форму, что уменьшает остаточный прогиб образца y_{fix} .

Сравнение различных схем армирования показывает, что оптимальными с точки зрения исследуемых параметров памяти формы являются образцы со схемой армирования $[0_3]$ при скорости нагружения 1 мм/с, так как они имеют максимальную степень и скорость восстановления формы. При этом степень фиксации формы не

имеет выраженной зависимости от скорости нагружения и схемы армирования. Таким образом, материал со схемой армирования $[0_3]$ принят как наиболее перспективный для использования в конструкции шпангоута. Результаты испытаний образцов из данного материала согласно п. 3. (рис. 7) в целом не показали выраженной зависимости свойств памяти формы от времени выдержки в деформированном состоянии. Данные заключительных испытаний по п. 4 представлены в табл. 2.

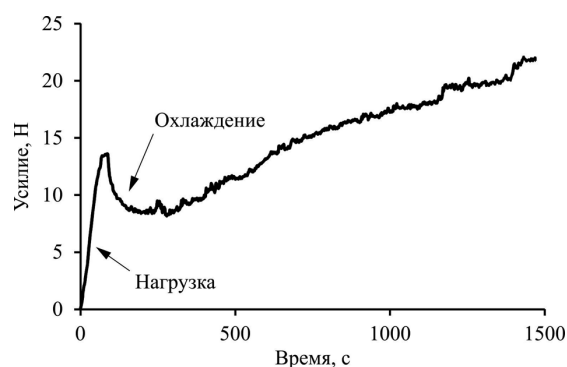


Рис. 6. Диаграмма изменения усилия при фиксации временной формы

Fig. 6. The load diagram during fixation of the temporary form

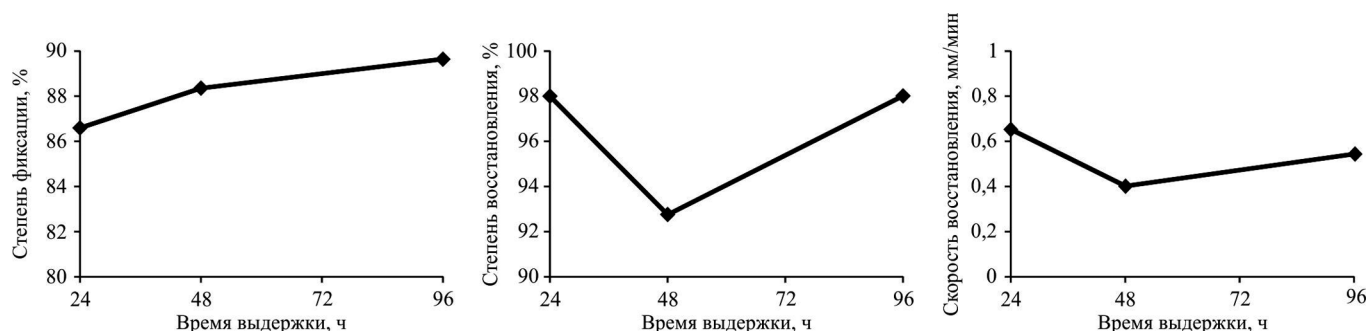


Рис. 7. Результаты испытаний согласно п. 3

Fig. 7. The results of testing at stage 3

Выводы

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 — при повышенной. Это обусловлено размягчением матрицы при температурах, близких к температуре стеклования или выше, вследствие чего нарушается связь между армирующими волокнами материала, снижаются его жесткость и прочность.

Из проведенных исследований следует, 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 $[O_3]$. Однако следует учитывать существенное влияние температуры на механические свойства материала. Для обеспечения стабильности его свойств и управляемой температурной активации в условиях космического пространства целесообразно применять теплоизоляцию в конструкции шпангоута рефлектора космической антенны.

Благодарности

Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Мини-

стерства образования и науки России). Договор № 02.G25.31.0147.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Meng H., Li G. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites / *Polymer*. 2013. Vol. 54. N 9. P. 2199 – 2221.
2. US Pat. 5128197. Kobayashi K., Hayashi S. Woven fabric made of shape memory polymer.
3. Nelson A. Stimuli-responsive polymers: engineering interactions / *Nat Mater*. 2008. N 7. P. 523 – 525.
4. Leng J., Lan X., Yanju Liu Y., Du S. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications / *Progress in Materials Science*. 2011. Vol. 56. N 7. P. 1077 – 1135.
5. Mather P., Luo X., Rousseau I. Shape Memory Polymer Research / *Annu. Rev. Mater. Res.* 2009. N 39. P. 445 – 471.
6. Liu Y., Du H., Liu L., Leng J. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review / *Smart Materials Structures*. 2014. Vol. 23. N 2. P. 23001 – 23022.
7. Keller P., Lake M., Codell D., Barrett R., Taylor R., Schultz M. Development of Elastic Memory Composite Stiffeners for a Flexible Precision Reflector / 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2006.
8. Lake M. S., Beavers F. L. The fundamentals of designing deployable structures with elastic memory composites / 43rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. 2002.
9. Goldobina Y. L., Shalkov V. V. Perspective large-sized transformable reflector of umbrella type / *Proc. 19th Inter. Sci. Conf. "Reshetnev readings"*. 2015. N 19. P. 99 – 101.
10. Okhotkin K. G., Vlasov A. Yu., Zakharov Yu. V., Anin B. D. Analytical modeling of the flexible rim of space antenna reflectors / *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017. Vol. 58. N 5. P. 924 – 932.
11. Moskvichev E. V., Khakhlenkova A. A. Surface accuracy analysis of rigid reflector in mechanical and thermal loading / *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1915.
12. Zhang C. S., Ni Q. Q. Bending behavior of shape memory polymer based laminates / *Compos. Struct.* 2007. N 78. P. 153 – 161.
13. Merline J. D., Reghunadhan Nair C. P. Carbon/Epoxy Resin Based Elastic Memory Composites / *Eurasian ChemTech Journal*. 2012. N 14. P. 227 – 232.
14. Abrahamson E. R., Lake M. S., Munshi N. A., Gall K. Shape Memory Mechanics of an Elastic Memory Composite Resin / *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2003. N 14. P. 623 – 632.
15. Sutton M., Orteu J., Shreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. — Springer Science + Bussines media, 2009. — 321 p.

Таблица 2. Механические свойства материала шпангоута со схемой армирования $[O_3]$ при различных температурах

Table 2. The mechanical properties of the rim material with the reinforcement scheme $[O_3]$ at various temperatures

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