

УДК 539.5

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В КОМПОЗИТНОЙ СЛОИСТОЙ ОБОЛОЧКЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© 2022 г. Е. В. Карпов^{1,*}, А. Ю. Ларичкин^{1,**}, Б. Д. Аннин^{1,***}¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

*e-mail: evkarpov@mail.ru

**e-mail: larichking@gmail.com

***e-mail: annin@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 04.03.2022 г.

После доработки 06.05.2022 г.

Принята к публикации 15.05.2022 г.

Проведены экспериментальные исследования по разворачиванию элемента шпангоута антенны космического спутника из композита с термоактивируемой памятью формы из деформированного транспортного состояния в исходное рабочее. Элемент представляет собой углепластиковую оболочку открытого профиля двойной кривизны, которая для получения транспортного состояния изгибается вокруг цилиндрической направляющей поверхности, перпендикулярной одному из радиусов исходной кривизны. Обнаружено, что у оболочки двойной кривизны существует промежуточное равновесное состояние между транспортным и рабочим. Для выхода из этого состояния необходим дополнительный нагрев. Таким образом существует температурный диапазон, в котором эффект памяти формы материала реализуется, но разворачивания конструкции не происходит. Выход из этого состояния происходит скачкообразно, что может создавать нежелательные колебания рефлектора антенны.

Ключевые слова: эффект памяти формы, композит с памятью формы, углепластик

DOI: 10.31857/S0032823522040099

1. Введение. Полимерные смолы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ), известны с 80-х годов прошлого века [1–3]. ЭПФ в полимерах связан с запаздывающими механически обратимыми деформациями. Для тела из полимера с памятью формы исходной формой является та, в которой произошла полимеризация материала. Будучи деформированным при температуре выше температуры стеклования и охлажденным, оно ведет себя, как тело, подвергнутое упругопластической формовке — сохраняет новую форму за вычетом частично восстановленных упругих деформаций. Но замороженные высокоэластические деформации, в отличие от пластических, являются обратимыми, т.е. после формовки в теле сохраняются внутренние напряжения, действие которых возвращает тело к исходной форме при появлении воздействия, активирующего ЭПФ, например, при нагреве, электромагнитном или химическом воздействии, в зависимости от типа полимера. На основе полимерных смол с ЭПФ могут быть изготовлены волокнистые или тканые композиты (например, стекло- или углепластики). Такие композиты обладают высокой удельной прочностью при малой плотности, что делает их перспективными материалами для космической техники, где они могут использоваться, например, для создания саморазворачивающихся конструкций [7, 8], которые в процессе вывода на орбиту находятся в свернутом компактном состоянии. В частности, элементы, изготовленные из композита с

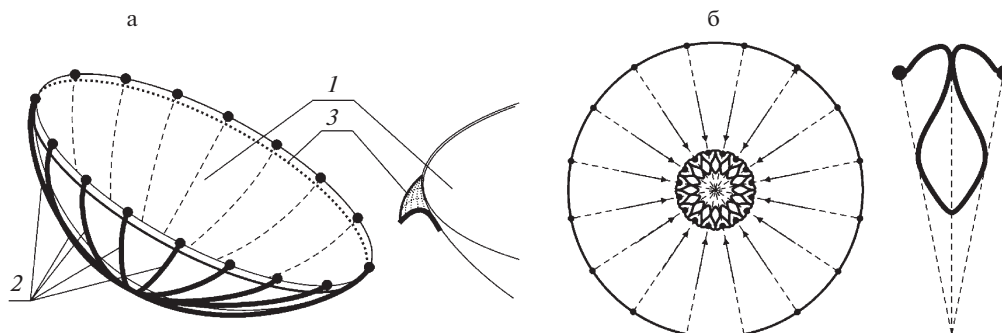


Рис. 1. Схема антенны и шпангоута: а) 1 – рефлектор, 2 – спицы, 3 – шпангоут; б) переход кольцевого шпангоута из рабочего состояния в транспортное, форма одного сектора шпангоута в свернутом состоянии.

памятью формы, используются в конструкции прецизионного рефлектора космической антенны, разрабатываемого АО “Информационные спутниковые системы” совместно с СибГУ им. М.Ф. Решетнева [9, 10]. Рефлектор представляет собой тонкую композитную оболочку радиуса 4 м, закрепленную на шестнадцати спицах (рис. 1, а). По периметру рефлектора установлен шпангоут, который представляет собой тонкую кольцевую оболочку с приближенно гиперболическим поперечным сечением, изготовленную из углепластика с памятью формы. В транспортном (свернутом) состоянии поперечное сечение шпангоута распрямлено, его сегменты изогнуты, как показано на рис. 1, б. При нагреве до заданной температуры сегменты шпангоута должны принять исходную форму, обеспечив жесткость периферии рефлектора, что необходимо для повышения точности формы отражающей поверхности и увеличения качества сигнала.

Полимерные композиты с ЭПФ наследуют эффект памяти формы от связующего [4–6], но его реализация зависит от взаимодействия связующего с высокопрочными волокнами или тканями из них, используемыми в качестве армирующего компонента. С одной стороны, упругая энергия, запасенная в деформированных волокнах, как на стадии изготовления композита, так и на стадии приведения его в промежуточную форму, может влиять на деформирование связующего после активации ЭПФ. С другой стороны, волокна и тем более слои ткани способны выдерживать значительно меньшие деформации, чем связующее при температуре выше температуры стеклования, что может приводить к образованию заломов, локальных потерь устойчивости и расслоению композитов. Например, показано [7], что в эластичном однонаправленном композите с памятью формы происходит локальная потеря устойчивости из-за перегиба сжимаемых волокон. Кроме того, поведение плоской слоистой оболочки из углепластика с памятью формы [12] существенно зависит от ориентации волокон ткани относительно направления изгиба при приведении оболочки в промежуточную форму, что связано с формированием систем локальных структурных дефектов.

Целью данной работы было экспериментальное исследование поведения слоистой углепластиковой оболочки со сложной исходной формой (сегмента шпангоута саморазворачиваемой параболической антенны) при реализации эффекта памяти формы полимерного связующего.

2. Материал, объект и постановка экспериментов. Материал, из которого были изготовлены сегменты шпангоута, состоит из трех слоев углеткани, пропитанных реактопластом Diaplex MP5510 производства Японии, который обладает эффектом памяти формы. Массовое соотношение связующего и углеткани 40:60. Ткань состоит из углеродных волокон СТ 12073 с диаметром 7 мкм, пределом прочности 3530 МПа, моду-

лем упругости 230 ГПа, имеет полотняное плетение с размером ячейки 2 мм, толщину 0.2 мм и поверхностную плотность 200 г/м². Температура стеклования Diaplex MP5510 составляет 55°C, температура отверждения – 70°C. Образцы были изготовлены в ресурсном центре “Космические аппараты и системы”.

Установлено [12], что образцы такого материала с одинаковой ориентацией всех слоев по-разному реагируют на деформирование при изгибе под разными углами к направлению волокон. При ориентации [0, 0, 0] при продольном изгибе пластины деформация в основном сосредоточена в небольшой части образца, где поперечные волокна остаются прямыми, а продольные теряют устойчивость, в результате чего образуются системы структурных дефектов в виде локальных выпучиваний, заломов и расслоений, тогда как большая часть образца остается плоской. При ориентации [0, –45, 45] деформирование распределяется по образцу относительно равномерно, причем происходит изгиб как продольного, так и поперечного сечения образца (поверхность приобретает вид, подобный однополостному гиперболоиду), все волокна остаются практически прямыми, необратимых изменений не наблюдается. Но при этом ориентация [0, 0, 0] обеспечивает заметно лучшее восстановление начальной формы при активации ЭПФ, чем [0, –45, 45]. Для осреднения этих эффектов сегменты шпангоута были изготовлены из слоев с различной ориентацией относительно продольного направления. Внешний слой имел ориентацию [0, 0, 0], а внутренний – [0, –45, 45].

Образцы представляли собой сегменты кольцевого шпангоута (рис. 2) длиной 0.28 м. Линия АВ – продольное сечение сегмента, проходящее через точки максимальной кривизны поперечных сечений. CD – поперечное сечение, на котором при сворачивании шпангоута находится точка максимальной кривизны АВ. Поскольку радиус кривизны шпангоута равен 4 м, образующие, параллельные линии АВ, близки к прямым линиям. Направляющие, параллельные линии CD, имеют длину 0.1 м и приближенно гиперболическую форму. Такая конструкция шпангоута придает ему большую изгибную жесткость в направлении АВ, поскольку для изгиба АВ при сохранении криволинейности CD необходимо растяжение в направлении АВ, превышающее возможности растяжения углеткани без разрушения (рис. 2, в). Для выпрямления CD в свою очередь необходимо растяжение внутреннего тканевого слоя и сжатие внешнего, в котором при сжатии происходят локальные потери устойчивости (рис. 2, г), образующие выпучивания и отслоения от среднего слоя. При обычной температуре, когда связующее находится в стекловидном (твердом и хрупком) состоянии, распрямление CD невозможно без образования трещин вдоль АВ. При температуре выше температуры стеклования, когда связующее становится упругоэластичным, повреждение материала при распрямлении CD ограничивается образованием системы дефектов из-за потери устойчивости внешнего слоя. Эти дефекты представляют собой выпучивания, расположенные в шахматном порядке в ячейках ткани в области, которая примыкает к АВ и имеет ширину около трети длины CD. На внутренней стороне дефектов не образуется.

После нагрева выше температуры стеклования и выпрямления CD образец может быть изогнут в направлении АВ одним из двух способов (рис. 2, д, е). Способ рис. 2, д далее назван внутренним изгибом (внутренний слой оболочки остается внутренним, то есть сжимается при изгибе), а способ 2, е – внешним (внутренний слой оболочки становится внешним, т.е. растягивается при изгибе). Внутренний изгиб в различной степени реализуется в основной части сегмента шпангоута, а внешний – вблизи креплений сегмента к спицам антенны (рис. 1, б).

Таким образом, образец подвергается деформированию, имеющему место на различных участках шпангоута при сворачивании из исходного ненапряженного состояния в транспортное. Изгиб образцов в транспортную форму проводился при помощи машины для испытаний на одноосное растяжение по схемам, изображенным на рис. 3,

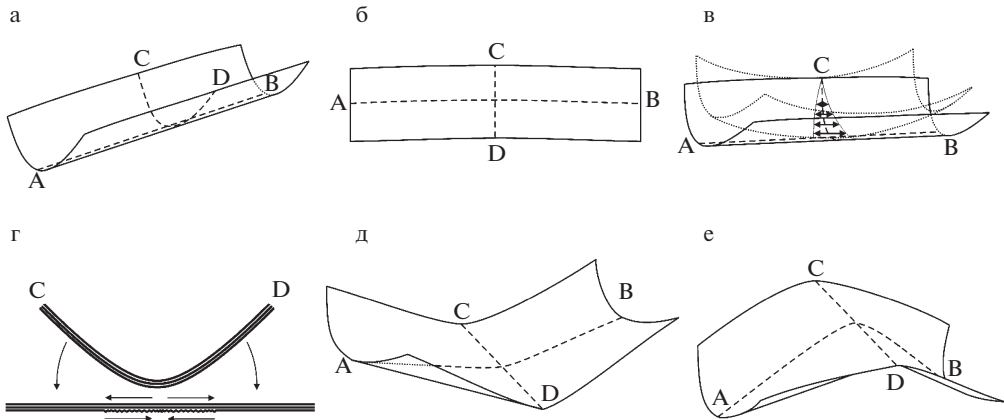


Рис. 2. Геометрия образцов и схемы их деформирования.

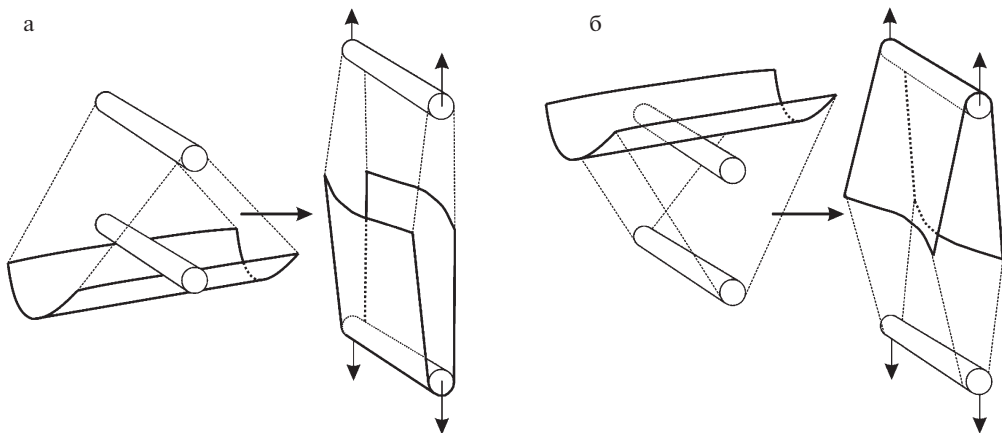


Рис. 3. Схема реализации внутреннего и внешнего изгиба сектора шпангоута при переходе от исходной не-напряженной формы к свернутой транспортной ($T = 70^{\circ}\text{C}$).

при температуре 70°C , после чего образцы охлаждались в нагруженном состоянии для фиксации транспортной формы и затем разгружались.

Образцы с зафиксированной транспортной формой помещались в термокамеру, нагреваемую за счет конвекции от электронагревателя, отделенного экраном от рабочего пространства. Один конец образца фиксировался и с помощью инфракрасной камеры IRBIS 8355 InfraTec производилась съемка процесса раскрытия образцов в исходную форму при нагреве. На основе данных съемки были получены зависимости температуры образцов T и угла раскрытия α от времени (см. рис. 4, б). Замер угла α проводился по внешней кромке образцов из-за ограниченных возможностей наблюдения за образцами в термокамере, поэтому при внутреннем изгибе криволинейных образцов α меньше угла раскрытия вдоль АВ, а при внешнем – больше, но в обоих случаях α позволяет отслеживать процесс перехода образца от транспортной формы к исходной и фиксировать момент окончательного выпрямления АВ. Испытания про-

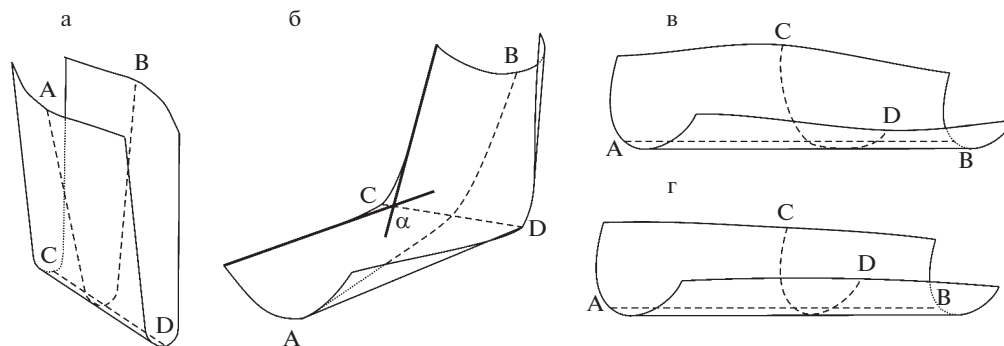


Рис. 4. Стадии перехода образца из транспортной формы в исходную при реализации ЭПФ: а – транспортная форма; б – форма, устойчивая в направлении CD; в – форма, устойчивая в направлении АВ; г – рабочая форма.

водились на образцах, подвергнутых предварительному внутреннему и внешнему изгибу при непрерывном и ступенчатом нагреве до $67\text{--}70^\circ\text{C}$, а также на контрольном плоском образце из того же материала с теми же размерами.

На рис. 5 приведены зависимости температуры образца и угла раскрытия от времени для всех образцов: 1 – контрольный плоский образец при непрерывном нагреве до 70°C ; 2, 3 – образцы с внутренним изгибом при непрерывном нагреве до 70°C ; 4 – образец с внешним изгибом при непрерывном нагреве до 70°C ; 5, 6 – образцы с внешним изгибом при ступенчатом нагреве ($60\text{--}65^\circ\text{C}$) и ($60\text{--}62\text{--}63\text{--}65\text{--}67^\circ\text{C}$); 7, 8, 9 – образцы с внутренним изгибом при ступенчатом нагреве ($60\text{--}70^\circ\text{C}$), ($60\text{--}65\text{--}67^\circ\text{C}$) и ($60\text{--}65\text{--}67^\circ\text{C}$). Маркеры на кривых $\alpha(t)$ соответствуют моментам перехода на следующую ступень нагрева.

На рис. 6 приведены зависимости угла раскрытия от температуры образца, полученные из зависимостей $\alpha(t)$ и $T(t)$ исключением времени: 1 – контрольный плоский образец; 2 – образец с внутренним изгибом при непрерывном нагреве; 3 – образец с внутренним изгибом при ступенчатом нагреве; 4 – образец с внешним изгибом при непрерывном нагреве; 5 – образец с внешним изгибом при ступенчатом нагреве.

3. Обсуждение результатов. Полученные зависимости $\alpha(t)$ указывают на то, что в оболочке, выполненной из тканого композита, связующим которого является полимер с ЭПФ, при нагреве действуют два независимых механизма восстановления исходной формы. Первый из них активируется при температуре, не достигающей температуры стеклования, при которой активируется ЭПФ полимера в деформированных областях образца. Температура его активации зависит от исходной формы оболочки: для плоской оболочки в нашем случае ее значение было близко к 45°C , для криволинейных – около 50°C , тогда как температура стеклования связующего – 55°C . Вероятно, активация восстановления формы до достижения температуры стеклования связующего происходит за счет упругой энергии, запасенной в деформированной конструкции, которую образуют три склеенных слоя углеткани, и высвобождаемой из-за снижения жесткости связующего при нагреве. Причиной относительно низкой температуры активации этого механизма у плоской оболочки может служить то, что локальные дефекты, приобретаемые плоской оболочкой при приведении в транспортную форму и снижающие запасенную упругую энергию, минимальны по сравнению с криволинейными оболочками. После достижения температуры стеклования оба механизма восстановления формы – высвобождение упругой энергии упрочняющего ком-

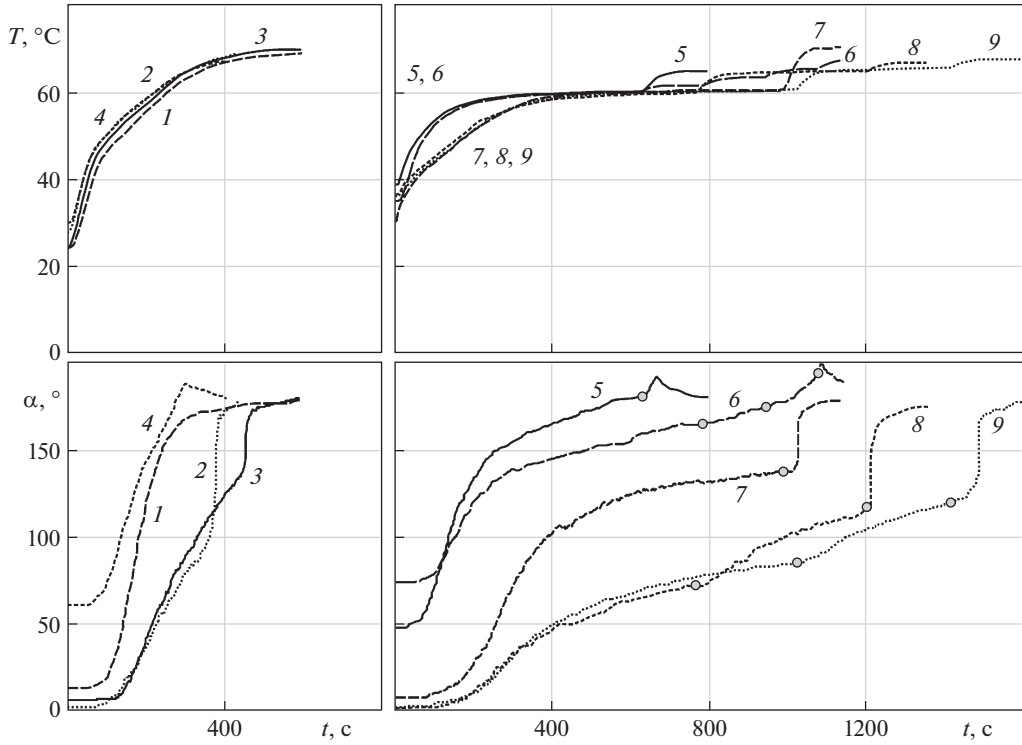


Рис. 5.

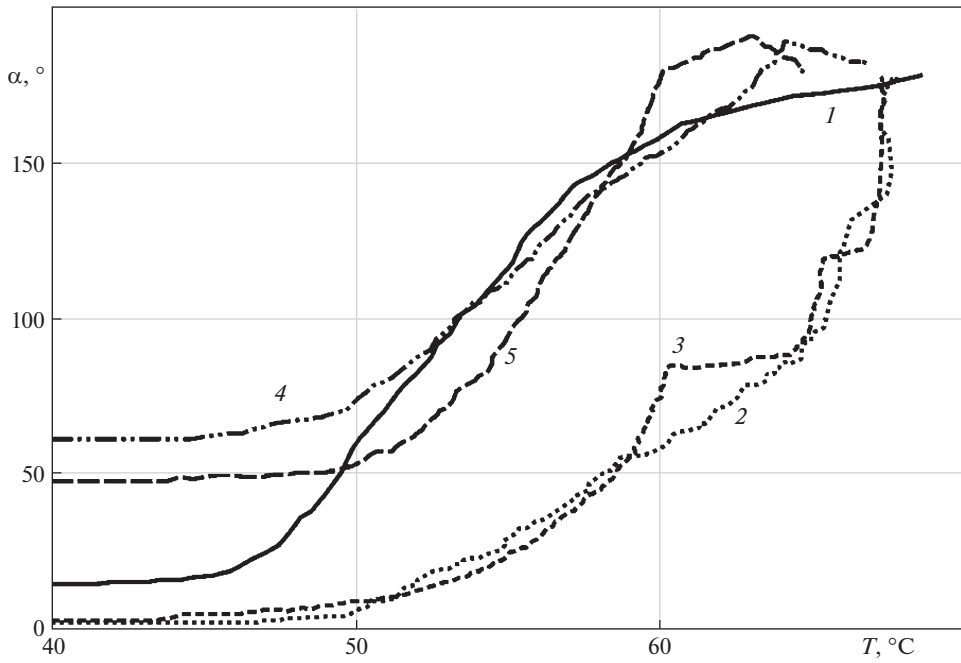


Рис. 6.

понтента и ЭПФ связующего работают совместно. При активации второго механизма не происходит заметного изменения скорости восстановления. Скорость раскрытия при постоянном нагреве для всех образцов тем больше, чем больше кривизна в области перегиба. При ступенчатом нагреве (наличии выдержек при постоянной температуре для ряда значений температуры) скорость раскрытия уменьшается при снижении скорости роста температуры и при постоянном значении температуры.

Было показано [12], что плоские оболочки после приведения в промежуточную изогнутую форму и реализации ЭПФ не восстанавливают исходную форму полностью и накапливают расхождение с ней при повторении циклов промежуточная форма – восстановленная форма. На рис. 5 можно видеть, что после достижения угла раскрытия около 160° (в исходной форме он равен 180°) скорость восстановления резко снижается, причиной чему может быть исчерпание одного из двух механизмов восстановления. Например, влияние ЭПФ полимерного связующего на изменение формы может уменьшаться из-за уменьшения деформированной области, т.е. объема полимера, являющегося источником восстанавливающих сил. Поскольку восстановленная форма в итоге сохраняет изгиб в несколько градусов, она неустойчива при сжатии вдоль АВ в отличие от исходной формы.

Все промежуточные состояния исходно плоской оболочки при переходе от транспортной формы к исходной, отличаются друг от друга только величиной угла раскрытия и размерами деформированной области. У оболочки с двойной кривизной между транспортной и исходной формами существует два существенно различных состояния (см. рис. 4).

В первом состоянии (рис. 4, б) сечение АВ криволинейно, а поперечное сечение CD прямолинейно. Поскольку возвращение CD в криволинейную форму возможно только при выпрямлении АВ, восстановление исходной формы АВ происходит как за счет восстанавливающих сил, вызванных отклонением текущей криволинейной формы АВ от начальной прямой, так и за счет восстанавливающих сил, действующих в поперечном направлении, вызванных отклонением текущей прямолинейной формы CD от начальной криволинейной. В этом состоянии форма устойчива в направлении CD и неустойчива в направлении АВ.

Во втором состоянии (рис. 4, в) сечение АВ прямолинейно, а поперечное сечение CD криволинейно и со временем приближается к исходной форме. В этом состоянии форма устойчива в направлении АВ и неустойчива в направлении CD. Переход между двумя состояниями представляет собой потерю устойчивости в направлении CD и при внутреннем и внешнем изгибе происходит существенно разным образом.

При внутреннем изгибе потеря устойчивости в направлении CD с восстановлением устойчивости в направлении АВ при постоянной скорости нагрева происходит скачкообразно с увеличением скорости раскрытия на два порядка. При раскрытии антенны скачкообразное изменение формы шпангоута может стать причиной колебаний ткани рефлектора, гашение которых в космосе из-за отсутствия сопротивления воздуха проблематично. При внешнем изгибе скорость раскрытия при постоянной скорости нагрева остается постоянной, при ступенчатом нагреве наблюдалось увеличение скорости раскрытия в переходном состоянии в 4–7, но скачкообразного перехода не происходило.

На графиках $\alpha(t)$ момент восстановления исходной устойчивой формы АВ соответствует скачку на кривых 2, 3, 7–9 (внутренний изгиб) и точке максимума на кривых 4–6 (внешний изгиб).

Проведение испытаний со ступенчатым нагревом показало, что при внутреннем изгибе остановка нагрева при температуре ниже 68°C происходит замедление и остановка процесса раскрытия свернутого шпангоута. При продолжении нагрева процесс раскрытия возобновляется. У всех образцов при ступенчатом нагреве скачкообразная потеря устойчивости в направлении CD происходила после перехода на последнюю

ступень нагрева. При промежуточных переходах между ступенями нагрева происходило увеличение скорости раскрытия. Для внешнего изгиба (рис. 5, кривая b $\alpha(t)$) влияния промежуточных переходов на скорость раскрытия не наблюдалось.

Сечение СВ, как и исходно плоская оболочка, восстанавливает исходную форму не полностью, однако главное функциональное свойство развернутого шпангоута — устойчивость в направлении АВ — полностью восстанавливается как после внутреннего изгиба, так и после внешнего. Однако, как показывают проведенные исследования, при восстановлении из промежуточной формы, полученной внутренним изгибом, существует промежуточное состояние, в котором восстанавливающие силы, действующие в различных направлениях, уравниваются и восстановление формы прекращается, если не происходит дополнительного увеличения энергии системы за счет нагрева.

Таким образом, для композитной оболочки двойной кривизны существует диапазон температур, в котором активация эффекта памяти формы связующего полимера, носителя ЭПФ, не приводит к восстановлению рабочей формы, а выход за пределы этого диапазона приводит к скачкообразному раскрытию свернутой оболочки, что может служить источником нежелательных колебаний конструкции. С другой стороны, такая оболочка может быть использована в различных устройствах в качестве механического актуатора, температура срабатывания которого при одном и том же материале полимерного связующего с ЭПФ может быть задана выбором исходной формы.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ (проект 075-15-2020-781).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белошенко В.А., Варюхин В.Н., Возняк Ю.В. Эффект памяти формы в полимерах // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 3. С. 285–306.
2. Nelson A. Stimuli-responsive polymers: engineering interactions // Nat. Mater. 2008. № 7. P. 523–525.
3. Mather P., Luo X., Rousseau I. Shape memory polymer research // Annu. Rev. Mater. Res. 2009. № 39. P. 445–471.
4. Kobayashi K., Hayashi S. Woven fabric made of shape memory polymer // US Pat. 5128197.
5. Leng J., Lan X., Yanju Liu Y. et al. Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications // Progr. in Mater. Sci. 2011. V. 56. № 7. P. 1077–1135.
6. Meng H., Li G. A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites // Polymer. 2013. V. 54. № 9. P. 2199–2221.
7. Liu Y., Du H., Liu L. et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review // Smart Mater. Struct. 2014. V. 23. № 2. P. 23001–23022.
8. Москвичев Е.В., Ларичкин А.Ю. Исследования функциональных и механических свойств полимерного композитного материала с памятью формы для рефлектора космической антенны // Заводская лабор. Диагн. матер. 2020. Т. 86. № 1. С. 51–56.
9. Охоткин К.Г., Власов А.Ю., Захаров Ю.В. и др. Аналитическое моделирование гибкого обода рефлекторов космических антенн // ПМТФ. 2017. Т. 58. № 5. С. 190–200.
10. Moskvichev E.V., Khakhlenkova A.A. Surface accuracy analysis of rigid reflector in mechanical and thermal loading // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1915.
11. Zhiyuan X., Rui W., Song R. et al. Nonlinear bending behavior of EMC laminates at elevated temperatures // 2016 Int. Conf. on Innovative Material Science and Technology. P. 425–435.
12. Аннин Б.Д., Карпов Е.В., Ларичкин А.Ю. Влияние анизотропии на деформирование полимерного композита с памятью формы // Изв. РАН. МТТ. 2020. № 6. С. 6–13.

Shape Memory Effect in Composite Layered Shell of Complex Shape

E. V. Karpov^{a,#}, A. Yu. Larichkin^{a,##}, and B. D. Annin^{a,###}

^a *Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS, Novosibirsk, Russia*

[#] *e-mail: evkarpov@mail.ru*

^{##} *e-mail: larichking@gmail.com*

^{###} *e-mail: annin@hydro.nsc.ru*

Experimental studies have been carried out on the deployment of a space satellite antenna frame element made of a composite with thermally activated shape memory from a deformed transport state to the initial working state. The element is a carbon-fiber shell of an open profile of double curvature, which, in order to obtain a transport state, is bent around a cylindrical guide surface perpendicular to one of the radii of the initial curvature. It was found that the shell of double curvature has an intermediate equilibrium state between the transport and working ones. To exit this state, additional heating is required. Thus, there is a temperature range in which the shape memory effect of the material is realized, but the unfolding of the structure does not occur. The exit from this state occurs abruptly, which can create unwanted oscillations of the antenna reflector.

Keywords: shape memory effect, shape memory composite, carbon fiber

REFERENCES

1. *Beloshenko V.A., Varyukhin V.N., Voznyak Yu.V.* The shape memory effect in polymers // Russ. Chem. Rev., 2005, vol. 74, no. 3, pp. 285–306. (in Russian)
2. *Nelson A.* Stimuli-responsive polymers: engineering interactions // Nat. Mater., 2008, no. 7, pp. 523–525.
3. *Mather P., Luo X., Rousseau I.* Shape Memory Polymer Research // Annu. Rev. Mater. Res., 2009, no. 39, pp. 445–471.
4. *Kobayashi K., Hayashi S.* Woven fabric made of shape memory polymer // US Pat. 5128197.
5. *Leng J., Lan X., Yanju Liu Y. et al.* Shape-memory polymers and their composites: Stimulus methods and applications // Progr. in Mater. Sci., 2011, vol. 56, no. 7, pp. 1077–1135.
6. *Meng H., Li G.* A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites // Polymer, 2013, vol. 54, no. 9, pp. 2199–2221.
7. *Liu Y., Du H., Liu L. et al.* Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review // Smart Mater. Struct., 2014, vol. 23, no. 2, pp. 23001–23022.
8. *Moskvichev E.V., Larichkin A.Yu.* Experimental study of the functional and mechanical properties of shape memory polymer composites for a reflector of the space antenna // Zavodskaja Lab. Diagn. Mater., 2020, vol. 86, no. 1, pp. 51–56. (in Russian)
9. *Okhotkin K.G., Vlasov A.Yu., Zakharov Yu.V., Annin B.D.* Analytical modeling of the flexible rim of space antenna reflectors // J. Appl. Mech.&Techn. Phys., 2017, vol. 58, no. 5, pp. 924–932.
10. *Moskvichev E.V., Khakhlenkova A.A.* Surface accuracy analysis of rigid reflector in mechanical and thermal loading // AIP Conf. Proc., 2017, vol. 1915.
11. *Zhiyuan X., Rui W., Song R. et al.* Nonlinear bending behavior of EMC laminates at elevated temperatures // 2016 Int. Conf. on Innovative Material Science and Technology, pp. 425–435.
12. *Annin B.D., Karpov E.V., Larichkin A.Y.* Influence of anisotropy on the deformation of a polymer composite with shape memory // Mech. Solids, 2020, vol. 55, no. 6, pp. 761–766.