

## Термостимулируемый шарнир для трансформируемых космических конструкций

П. Г. Бабаевский,<sup>\*</sup> Н. А. Козлов,<sup>†</sup> И. Г. Агапов,<sup>‡</sup> О. А. Неволько<sup>§</sup>

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ),  
Институт № 11, кафедра технологии композиционных материалов,  
конструкций и микросистем

Россия, 121552, Москва, ул. Оршанская, д. 3

(Статья поступила 19.03.2018; Подписана в печать 26.03.2018)

В статье описаны конструкция и испытания термостимулируемого шарнира из ПКМ с ЭПФ для трансформируемых космических конструкций. Проведено моделирование процесса нагрева шарнира с использованием программы ANSYSWorkbench при различных условиях окружающей среды и мощности нагрева с целью определения мощности источников тепла и выбора нагревателей. Проведено экспериментальное исследование процесса нагрева шарнира в обычных условиях с использованием встроенных нагревателей и определены степень, время и усилие восстановления им формы. Полученные результаты свидетельствуют о высокой работоспособности разработанного термостимулируемого шарнира и возможности его использования в трансформируемых космических конструкциях.

PACS: 81.05.Qk

УДК: 539.3, 541.64, 678.7

Ключевые слова: трансформируемые космические конструкции, полимерные композиционные материалы (ПКМ) с эффектом памяти формы (ЭПФ), шарниры для трансформируемых космических конструкций.

### ВВЕДЕНИЕ

Для создания космических трансформируемых конструкций различного назначения используются шарниры из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с эффектом памяти формы (ЭПФ), способные изменять свою форму под действием тепла, за счет чего происходит разворачивание трансформируемой конструкции из компактно сложенного состояния в рабочее [1]. Способность изменять свою форму ПКМ с ЭПФ проявляют при температуре равной и выше температуры стеклования матрицы, причем нагрев обычно осуществляется с использованием встроенных резистивных нагревателей. Целью данной работы является разработка конструкции, моделирование процесса нагрева до заданной температуры и экспериментальное исследование процесса нагрева, определение времени, степени и усилия восстановления первоначальной формы шарнира.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОСТИМУЛИРУЕМОГО ШАРНИРА

Термостимулируемый шарнир показан на рис. 1. Он состоит из двух полуцилиндрических и одного цилиндрического элементов из углепластика с ЭПФ. На концах шарнира расположены переходники из алюминиевого сплава АМГ6 для присоединения его к трансформируемой конструкции. Габаритные размеры шарнира

250×38×34 мм, вес 143 г, температура восстановления формы 120°C.

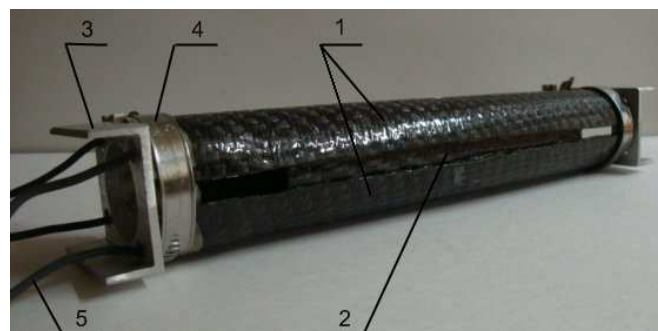


Рис. 1: Конструкция шарнира в сборе: полуцилиндрические элементы — 1, цилиндрический элемент — 2, переходники из алюминиевого сплава АМГ6 — 3, хомут — 4, провода для соединения нагревателей с источником тока — 5

В полуцилиндрические элементы встроены гибкие нагреватели (рис. 2).

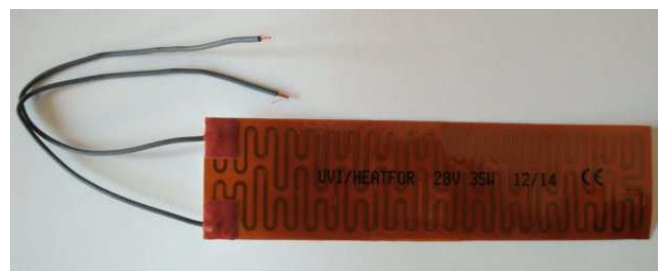


Рис. 2: Гибкий нагреватель

\*E-mail: [babaevskiygp@mati.ru](mailto:babaevskiygp@mati.ru)

†E-mail: [mail-kna@mail.ru](mailto:mail-kna@mail.ru)

‡E-mail: [agapovig@mati.ru](mailto:agapovig@mati.ru)

§E-mail: [nevolko93@mail.ru](mailto:nevolko93@mail.ru)

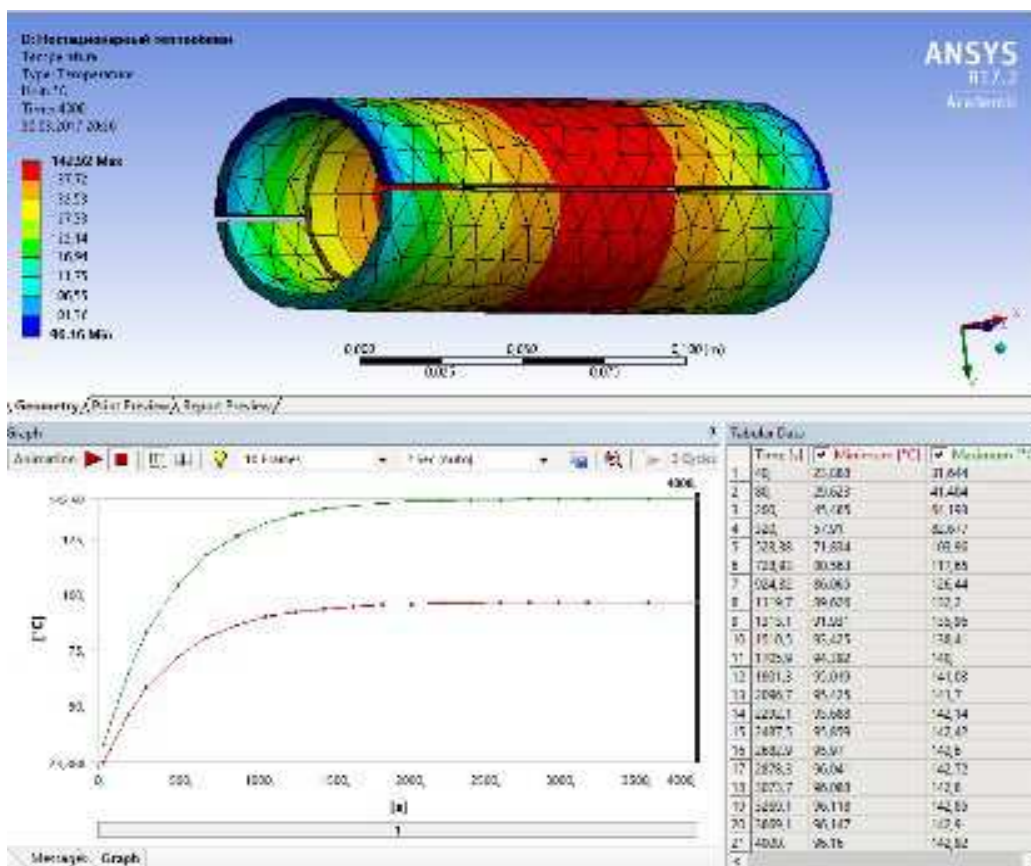


Рис. 3: Типичное изображение распределение температуры по шарниру

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ШАРНИРА

Для определения мощности источников тепла для нагрева материала шарнира до необходимой температуры предварительно моделировали процесс нагрева с использованием программы ANSYS Workbench. При этом в качестве начальных температур выбрали 22°C в воздушной среде и -50°C в условиях вакуума. Мощности источников варьировали от 20 до 100 Вт с интервалом 20 Вт. На рис. 3 показано типичное изображение распределение температуры по шарниру в виде цветной картинки, причем красный цвет соответствует максимальной температуре, а синий — минимальной.

По результатам моделирования установили, что мощность источников тепла, необходимая для нагрева материала шарнира до температуры восстановления формы, равна 60 Вт в воздушной среде и 40 Вт в условиях вакуума. Экспериментальное исследование процесса нагрева шарнира в обычных условиях с использованием нагревателей мощностью 60 Вт проводили, как показано на рис. 4. Температуру поверхности шарнира измеряли с помощью термопар, установленных в середине и на конце шарнира.

В результате эксперимента получили зависимости минимальной ( $T_{min}$ ) и максимальной темпера-

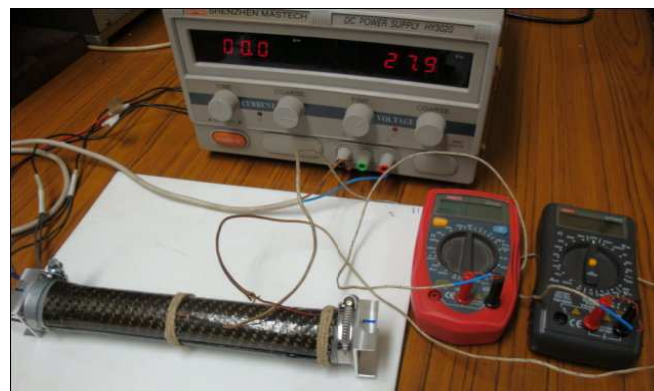


Рис. 4: Экспериментальное исследование процесса нагрева шарнира

тур ( $T_{max}$ ) шарнира от времени при мощности нагрева 60 Вт. На рис. 5 представлены экспериментальные и модельные зависимости  $T_{min}$  и  $T_{max}$  от времени, которые свидетельствуют о хорошем соответствии равновесных значений модельных и экспериментальных  $T_{min}$  и  $T_{max}$ .

Равновесные значения температур достигаются за 10 минут, при этом  $T_{max}$  достигает 159°C, а  $T_{min}$  —

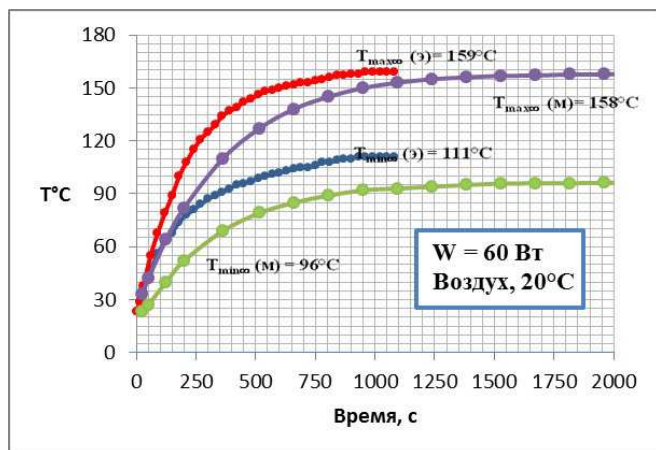


Рис. 5: Экспериментальные и модельные зависимости  $T_{min}$  и  $T_{max}$  от времени: красный —  $T_{max}$  (э — эксперимент); синий —  $T_{min}$  (э); фиолетовый —  $T_{max}$  (м — модель); зеленый —  $T_{min}$  (м)

111°C. Время достижения температуры восстановления формы шарнира 120°C составляет 4.5 мин.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ, СТЕПЕНИ И УСИЛИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ФОРМЫ ШАРНИРА

Определение времени и степени восстановления первоначальной формы шарнира проводили с использованием стенда, состоящего из источника постоянного тока, штатива и держателя шарнира (рис. 6) [2]. Шарниру предварительно придавали U-образную форму, закрепляли на штативе и подключали нагреватели к источнику постоянного тока.

Процесс восстановления формы шарнира фиксировали с помощью фотокамеры. Степень восстановления формы шарнира рассчитывали, как отношение конечного угла  $\theta_N$  к углу, равному 180°, который соответствует полному восстановлению формы (рис. 7).

Время достижения равновесной степени восстановления формы шарнира, равной 0.99, составило 4.5 мин. Усилие восстановления первоначальной формы шарнира определяли с использованием стенда, состоящего из источника постоянного тока, штатива, держателя образца и весов с пределом измерения 5 кг и точностью 1 г (рис. 8). Предварительно шарниру придавали U-образную форму, закрепляли на штативе и приводили в контакт с весами с начальным усилием 5–10 г путем вертикального перемещения держателя. Затем подключали нагреватели к источнику постоянного тока и наблюдали усилие восстановления формы шарнира, как показано на рис. 8.

Установлено, что максимальное усилие восстановления формы шарнира равно 12 Н (1.2 кг).



Рис. 6: Стенд для определения времени и степени восстановления формы шарнира

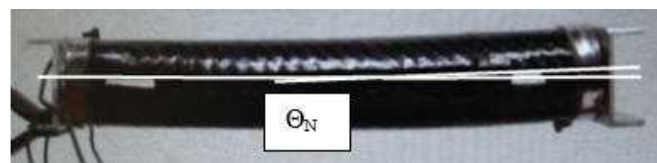


Рис. 7: Измерение начального и конечного углов шарнира

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан термостимулируемый шарнир, состоящий из двух полуцилиндрических и одного цилиндрического элементов из углепластика с ЭПФ. Проведено моделирование процесса нагрева материала шарнира до необходимой температуры с использованием программы ANSYS Workbench в условиях воздушной среды (22°C) и вакуума (–50°C), варьируя мощности источников от 20 до 100 Вт. Установлено, что мощность источников тепла, необходимая для нагрева материала шарнира до температуры восстановления формы, равна 60 Вт в воздушной среде и 40 Вт в условиях вакуума.



Рис. 8: Стенд для определения усилия восстановления первоначальной формы шарнира

Экспериментальное исследование процесса нагрева шарнира в обычных условиях с использованием нагревателей мощностью 60 Вт показало хорошее соответствие равновесных значений модельных и экспериментальных температур. Время достижения температуры восстановления формы шарнира 120°C составило 4.5 мин.

Определено время и степень восстановления первоначальной формы шарнира, которые составили 4.5 мин и 0.99 соответственно. Экспериментально определено усилие восстановления первоначальной формы шарнира, равное 12 Н.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования разработанного термостимулируемого шарнира в трансформируемых космических конструкциях.

[1] Бабаевский П.Г., Агапов И.Г., Козлов Н.А., Резниченко Г.М. Полимерный композиционный материал с эффектом памяти формы для силовых элементов трансформируемых конструкций. Материалы Всероссийской научно-технической конференции Новые материалы и технологии–НМТ–2012. Москва, 20–22 ноября 2012 г. М.: МАТИ, 2012. С. 93.

[2] Агапов И.Г., Гришин А.С. Трубчатый актуатор из ПКМ с эффектом памяти формы со встроенным резистивным нагревателем. XL ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 9 томах. Москва, 7–11 апреля 2014 г. 1. С. 34. М.: МАТИ, 2014.

## Thermostimulated hinge for transformable space structures

P. G. Babaevsky<sup>a</sup>, N. A. Kozlov<sup>b</sup>, I. G. Agapov<sup>c</sup>, O. A. Nevolko<sup>d</sup>

Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow Aviation Institute (National Research University)» (MAI),  
the Institute of number 11, Department of Technology of composite materials, structures and microsystems  
Moscow 121552, Russia

E-mail: <sup>a</sup>babaevskiypp@mati.ru, <sup>b</sup>mail-kna@mail.ru, <sup>c</sup>agapovig@mati.ru, <sup>d</sup>nevolko93@mail.ru

The article describes the design and testing of a thermally stimulated hinge made from polymeric composite material with shape memory effect for transformable space structures. Simulation of the hinge heating process using the ANSYS Workbench program under various environmental and heating conditions was carried out to determine the power of the heat sources and the selection of the heaters. An experimental study of the hinge heating process under ordinary conditions using built-in heaters is carried out, and the degree, time and effort of restoring it to the shape are determined. The received results testify to high working capacity of the developed thermostimulated hinge and the possibility of its use in transformable space structures.

PACS: 81.05.Qk

**Keywords:** transformable space structures, polymeric composite materials (PCM) with shape memory effect (SME), hinges for transformable space structures.

Received 19 March 2018.

### Сведения об авторах

1. Бабаевский Петр Гордеевич — доктор техн. наук, профессор; тел.: (499) 141-94-51, e-mail: babaevskiypp@mati.ru.
2. Козлов Николай Алексеевич — доктор техн. наук, профессор; тел.: (499) 141-94-51, e-mail: mail-kna@mail.ru.
3. Агапов Илья Георгиевич — канд. техн. наук, доцент; тел.: (499) 141-94-51, e-mail: agapovig@mati.ru.
4. Неволько Ольга Александровна — магистр, инженер; тел.: (499) 141-94-51, e-mail: nevolko93@mail.ru.