

УДК 629.8:531.395

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-109-115

**Для цитирования:** Оценка деформационно-силовых характеристик привода из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 1. С. 109–115. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-109-115.

**For citation:** Zimin V. N., Krylov A. V., Filippov V. S., Shakhverdov A. O. [Evaluation of force-deformation characteristics of an actuator made of material with a shape memory effect for transformable space structures]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 1, P. 109–115. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-1-109-115.

## Оценка деформационно-силовых характеристик привода из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций

В. Н. Зимин<sup>\*</sup>, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана  
Российская Федерация, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, к. 1

<sup>\*</sup>E-mail: zimin@bmstu.ru

*Перспективы развития космической техники в настоящее время тесно связаны с созданием принципиально новых крупногабаритных космических конструкций. При проектировании крупногабаритных систем, схема которых допускает автоматическое изменение конфигурации конструкции, необходимо учитывать ударные нагрузки. Они неизбежно возникают при фиксации рабочего состояния конструкции на орбите по завершению процесса её раскрытия. Для обеспечения плавного, надежного и безударного раскрытия крупногабаритных космических конструкций предполагается использовать силовые приводы с активными элементами, выполненными из материала никелида титана, обладающего эффектом памяти формы. В предлагаемом силовом приводе с эффектом памяти формы применен активный элемент в виде проволоки, изготовленной из материала никелида титана, нагреваемого в процессе работы путем пропускания через него электрического тока. Одним из главных параметров для привода раскрытия крупногабаритных конструкций является его деформационно-силовая характеристика. В работе были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение данной характеристики активного элемента привода. Изучение деформационно-силовой характеристики проводилось при двух видах нагружения: в одном усилии изменялось в процессе проведения испытания, а в другом – оставалось неизменным. Стоит отметить, что величина деформации, которую может произвести активный элемент, напрямую связана с величиной и характером силы сопротивления, приложенной к нему. В эксперименте активный элемент продемонстрировал значительное перемещение при значительной нагрузке. Полученные экспериментальные данные показывают принципиальную возможность использования активных элементов из материала с эффектом памяти формы в приводах раскрытия крупногабаритных космических конструкций. Полученная характеристика будет играть важную роль в разработке математической модели функционирования активного элемента из материала с эффектом памяти формы для раскрытия космической конструкции изменяемой конфигурации.*

*Ключевые слова:* трансформируемая космическая конструкция, привод, эффект памяти формы, силовая характеристика.

## Evaluation of force-deformation characteristics of an actuator made of material with a shape memory effect for transformable space structures

V. N. Zimin<sup>\*</sup>, A. V. Krylov, V. S., Filippov, A. O. Shakhverdov

Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskaya St., 5, building 1, 105005 Moscow, Russian Federation  
<sup>\*</sup>E-mail: zimin@bmstu.ru

*The prospects for the development of space technology are currently closely linked with the creation of fundamentally new large-sized space structures. When designing large-sized systems, the scheme of which allows for automatic configuration change of the structure, it is necessary to take into account shock loads. They inevitably arise when fixing the working state of the structure in orbit upon completion of the process of its opening. To ensure smooth, reliable and shock-free opening of large-sized space structures, it is proposed to use force actuators with active elements made of titanium nickelide material with a shape memory effect. The proposed shape memory force actuator uses an active element in the form of a wire made of titanium nickelide material which is being heated during operation by passing an electric current through it. One of the main parameters for the opening actuator of large-sized structures is its deformation-force characteristic. Experimental studies aimed at studying this characteristic of the active element of the actuator were carried out in the work. The study of the force-deformation characteristics was carried out under two types of loading: in one, the force changed during the test, and in the other it remained constant. It is worth noting that the amount of deformation that an active element can produce is directly related to the magnitude and nature of the resistance force applied to it. In the experiment, the active element demonstrated sufficient displacement under significant load. The experimental data obtained show the fundamental possibility of using active elements made of a material with a shape memory effect in the opening actuators of large-sized space structures. The obtained characteristic will play an important role in the development of a mathematical model of the functioning of an active element made of a material with a shape memory effect for the opening of a space structure with transformable configuration.*

*Keywords: transformable space structure, actuator, shape memory effect, force characteristics.*

### Введение

Крупногабаритные космические конструкции являются перспективным направлением развития ракетно-космической техники. Неизбежное усложнение конструктивных схем перспективных космических систем вследствие повышения их эксплуатационных функциональных возможностей приводит к необходимости создания больших космических конструкций. В практике создания космических конструкций значительную роль играет наземный эксперимент. Работоспособность космических конструкций изменяемой конфигурации определяется, главным образом, тем, насколько велики возникающие в них усилия при развертывании, поэтому обеспечение надежного раскрытия связано с решением сложных задач механики [1; 2]. Процесс изменения конфигурации происходит под воздействием силовых приводов, в качестве которых могут быть использованы сжатые или растянутые пружины, электродвигатели и т. д. Исследования в области применения материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) для создания термомеханических силовых приводов для космических систем в настоящее время вызывает повышенный интерес учёных, инженеров и конструкторов [3; 4]. Материал с ЭПФ можно использовать для создания силовых приводов благодаря его способности к восстановлению больших деформаций и созданию значительной силы [5–7]. Активный элемент такого силового

привода может быть выполнен в форме проволоки из материала с ЭПФ типа никелида титана [8–10]. Для успешного применения таких приводов для раскрытия космической конструкции изменяемой конфигурации необходимо определять как форму активного элемента, так и их функциональные возможности. Для определения основных характеристик активного элемента – развиваемое эксплуатационное усилие, время срабатывания, рабочий ход (максимальное перемещение) – были проведены экспериментальные исследования.

### 1. Экспериментальная установка

Для изучения деформационно-силовых характеристик активного элемента из материала с ЭПФ была разработана и построена экспериментальная установка (рис. 1, а). В процессе проведения экспериментов измерялись следующие характеристики привода: создаваемое перемещение, усилие сопротивления перемещению, температура активного элемента и изменение силы тока, протекающего через активный элемент. Для измерения перемещения, создаваемого активным элементом из материала с ЭПФ, использовался тросовый потенциометрический датчик перемещения, точность измерения которого составляет 0,01 мм. Измерение усилия сопротивления производилось при помощи цифрового динамометра с точностью измерения 0,2 Н. Все измерения фиксировались с частотой 5 Гц при помощи персонального компьютера. Для того, чтобы активный элемент привода из материала с ЭПФ сработал при нагреве, его необходимо предварительно деформировать. Предварительная деформация проводилась на 10 % на отдельной установке с использованием описанных выше систем измерения деформационно-силовых характеристик. Так как нагрев в условиях космического пространства рациональнее всего проводить пропусканием через активный элемент электрического тока, то и в экспериментальной установке нагрев проводился таким же способом [11–15].

### 2. Испытания с пружинными элементами

Была проведена серия экспериментов, где в качестве полезной нагрузки выступал набор пружинных элементов. К проволоке из никелида титана параллельно закреплялось различное количество одинаковых пружин растяжения (рис. 1, б). Количество пружин варьировалось от 1 до 7. При этом жесткость системы пружин изменялась от 20 до 175 Н/мм. Начальное усилие, действующее на активный элемент перед нагревом, составляло 40 Н во всех экспериментах серии.

Результаты измерения изменения длины активного элемента в серии экспериментов с пружинными элементами показаны в табл. 1: при минимальном сопротивлении активный элемент развил усилие в 0,18 кН при деформации 4,2 %, тогда как при наибольшем сопротивлении максимальное усилие, которое создал активный элемент, составило 0,68 кН, при этом деформация активного элемента равнялась порядка 2 %.

Таблица 1

Результаты испытаний с пружинными элементами

Кол-во пружин	Исходная длина образца, мм	Длина предварительно деформированного образца, мм	Длина образца перед нагревом, мм	Длина образца после нагрева, мм	Максимальное усилие, кН	Жесткость пружин, Н/мм
1	160,0	176,0	174,0	167,0	0,18	20
2	160,0	176,0	174,0	168,0	0,33	42
3	159,7	177,6	173,8	167,0	0,41	49
4	160,0	177,1	174,1	170,0	0,52	106
5	160,8	178,4	174,7	171,0	0,56	135
6	160,2	178,8	175,2	171,3	0,62	146
7	159,4	176,8	172,8	169,4	0,68	175

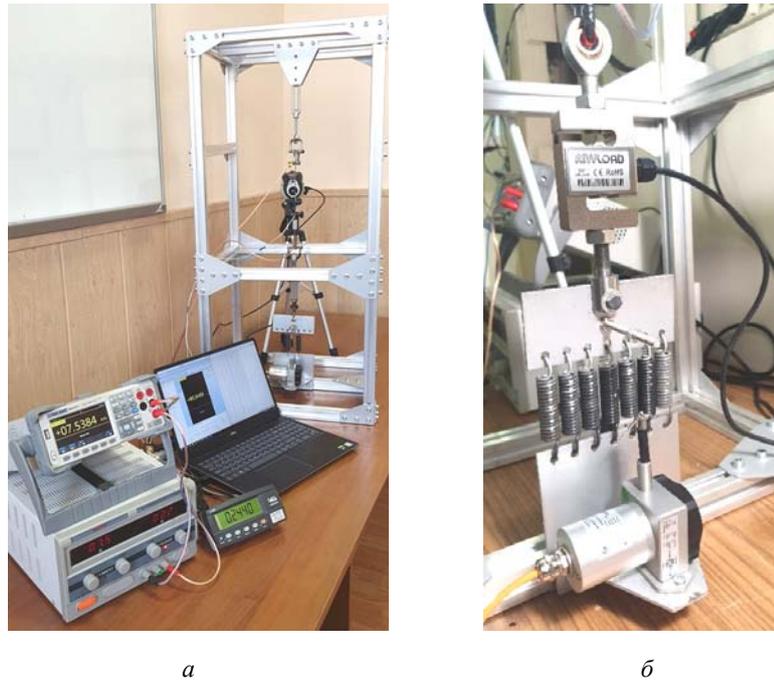


Рис. 1. Экспериментальная установка для испытаний с пружинными элементами:  
*a* – общий вид экспериментальной установки; *б* – набор пружинных элементов для создания усилия сопротивления

Fig. 1. Experimental setup for testing with spring elements:  
*a* – general view of the experimental setup; *b* – a set of spring elements for creating a resistance force

### 3. Испытания с грузом

Была проведена серия экспериментов, где активный элемент нагружался постоянным усилием в виде подвешенного к нему набора грузов (рис. 2, *a*). В данной серии экспериментов к активному элементу подвешивался набор из различного количества грузов одинаковой массы (2, *б*). Начальное усилие, действующее на активный элемент перед нагревом, в каждом эксперименте равнялось весу подвешенного груза. За минимальную массу была взята масса датчика динамометра.

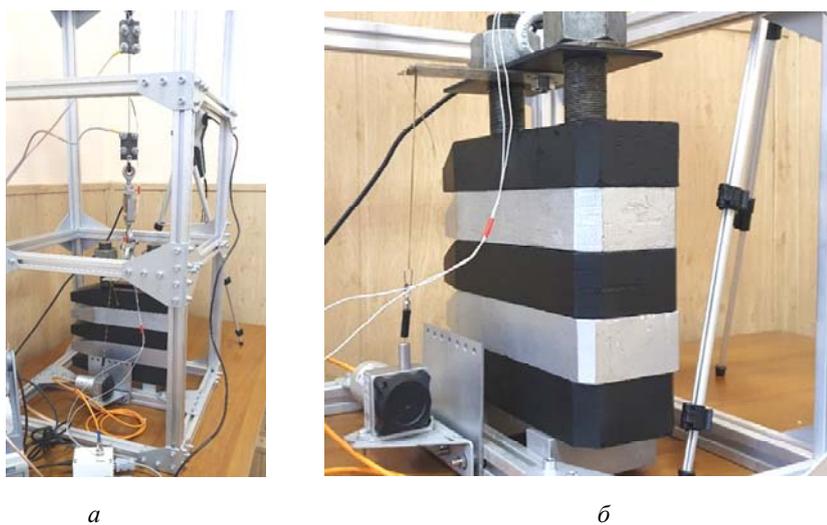


Рис. 2. Экспериментальная установка для испытаний с грузами:  
*a* – общий вид экспериментальной установки; *б* – набор грузов для создания усилия сопротивления

Fig. 2. Experimental setup for testing with weights:  
*a* – general view of the experimental setup; *b* – a set of weights for creating a resistance force

В табл. 2 представлены значения длины активного элемента в процессе проведения испытания, а также масса груза, прикреплённого к активному элементу в каждом испытании. Из данной таблицы видно, что в практически свободном состоянии с нагрузкой всего в 1 кг, рабочая деформация активного элемента составила 4,7 %, тогда как с максимальным грузом в 61,1 кг рабочая деформация составила 2,1 %.

Таблица 2

#### Результаты испытаний с подвешенной массой

Кол-во грузов	Исходная длина образца, мм	Длина предварительно деформированного образца, мм	Длина образца перед нагревом, мм	Длина образца после нагрева, мм	Масса груза, кг
0	159,6	175,7	172,5	164,4	1
1	160,2	176,4	173,0	165,7	10,8
2	160,4	176,5	173,6	166,4	17,9
3	159,7	175,7	172,7	166,2	24,6
4	160,2	176,3	173,1	167,1	31,9
5	159,9	175,9	173,1	168,0	39,3
6	160,5	176,6	173,7	168,9	46,1
7	160,0	176,1	173,0	168,4	53,6
8	159,9	176,0	172,7	169,1	61,1

#### Обсуждение результатов

Раскрытие крупногабаритных космических конструкций является сложным и высоконагруженным процессом. В процессе трансформации привода раскрытия необходимо преодолевать усилия, возникающие в шарнирах, а также инерционные силы. Полученные в работе деформационно-силовые характеристики являются важным этапом для создания модели раскрытия крупногабаритных космических конструкций с использованием приводов с активным элементом из материала с эффектом памяти формы.

#### Заключение

В процессе экспериментальных исследований были получены деформационно-силовые характеристики активного элемента привода. Было проведено два вида исследований: в первом усилие сопротивления возрастало в процессе работы привода, а во втором – оставалось постоянным. Во всех экспериментах активный элемент из материала с эффектом памяти формы произвёл значительную деформацию, даже при весьма высоких усилиях сопротивления. Стоит отметить, что величина деформации, которую может произвести активный элемент, напрямую связана с величиной и характером силы сопротивления, приложенной к нему. Данную особенность необходимо учитывать при проектировании приводов для раскрытия крупногабаритных конструкций. Результаты проведённых исследований показывают возможность использования приводов с активным элементом из материала с эффектом памяти формы для раскрытия крупногабаритных космических конструкций.

#### Библиографические ссылки

1. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн. Ч. 1 // Вестник СибГАУ. 2007, № 2 (15). С. 51–57.
2. Механика больших космических конструкций / Н. В. Баничук, И. И. Карпов, Д. М. Климов и др. М. : Факториал, 1997. 302 с.
3. Пономарев С. В. Трансформируемые рефлекторы антенн космических аппаратов // Вестник Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2011. № (16). С. 110–119.
4. Zheng F. Affordable System Conceptual Structure Design of New Deployable Spaceborne Antenna // 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition. 2015, P. 4343.

5. Привод из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, В. С. Филиппов, А. О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 1. С. 73–80.

6. Truss mounting in space by shape memory alloys / V. A. Likhachev, A. I. Razov, A. G. Cherniavsky et al. // Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA. 1994, P. 245–248.

7. Mathematical Modeling of Deployment Dynamics of Large Transformable Space Structures / V. N. Zimin, A. V. Krylov, G. N. Kuvyrkin, et al. // Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates. Advanced Structured Materials. 2023. Vol 176.

8. Riad A., Ainamany A., Benzohra M. The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation // Materials Research Express. 2017, Vol. 4, P. 7 075701.

9. De Laurentis K. J., Fisch A., Nikitezuk J., Mavroidis C. Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators // Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292). 2002. Vol. 3. P. 2363–2368.

10. К вопросу создания безударного привода раскрытия трансформируемых крупногабаритных космических конструкций / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахвердов // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2022. № 3(57). С. 47–51.

11. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators // Solid state Phenomena, 2006. Vol. 113. P. 195–198.

12. Zimin V. N., Krylov A. V., Shakhverdov A. O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures // Journal of Physics: Conference Series. 2021, No. 1. P. 012115. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012115.

13. Привод из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемой космической конструкции / В. Н. Зимин, А. В. Крылов, Г. Н. Кувыркин, А. О. Шахвердов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2021. № 4(348). С. 97–102.

14. Zimin V. N., Krylov A. V., Shakhverdov A. O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures // Journal of Physics: Conference Series 1902. 2021. P. 012115.

15. Mathematical and ground-based experiments when designing transformable space structures / V. N. Zimin, A. V. Krylov, G. N. Kuvyrkin, A. O. Shakhverdov // AIP Conference Proceedings 2503. 2022. P. 020006.

## References

1. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. [Overview of the designs of modern transformable space antennas. Part 1]. *Vestnik SibGAU*. 2007, No. 2 (15), P. 51–57 (In Russ.).

2. Banichuk N. V., Karpov I. I., Klimov D. M. et al. *Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruksii* [Mechanics of large space structures]. Moscow, Faktorial Publ., 1997, 302 p.

3. Ponomarev S. V. [Transformable reflectors of spacecraft antennas]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2011, No. 16, P. 110–119 (In Russ.).

4. Zheng F. Affordable System Conceptual Structure Design of New Deployable Spaceborne Antenna. *33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition*. 2015, P. 4343.

5. Zimin V. N., Krylov A. V., Filippov V. S., Shakhverdov A. O. [A drive made of a shape memory material for transformable space structures]. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*. 2022, Vol. 23, No. 1, P. 73–80 (In Russ.).

6. Likhachev V. A., Razov A. I., Cherniavsky A. G. et al. Truss mounting in space by shape memory alloys. *Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*. California, 1994, P. 245–248.

7. Zimin V. N., Krylov A. V., Kuvyrkin G. N., Shakhverdov A. O. et al. Mathematical Modeling of Deployment Dynamics of Large Transformable Space Structures. *Behavior of Materials under Impact*,

*Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates. Advanced Structured Materials.* 2023. Vol. 176.

8. Riad A., Ainamany A., Benzohra M. The shape memory alloy actuator controlled by the Sun's radiation. *Materials Research Express.* 2017, Vol. 4, P. 7 075701.

9. De Laurentis K. J., Fisch A., Nikitzuk J., Mavroidis C. Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators. *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 02CH37292). 2002, Vol. 3, P. 2363–2368.

10. Zimin V. N., Krylov A. V., Kuvyrkin G. N., Shakhverdov A. O. [On the issue of creating a shockless opening drive for transformable large space structures]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina.* 2022, No. 3(57), P. 47–51 (In Russ.).

11. Schiedeck F., Hemsel T., Wallaschek J. The use of shape memory alloy wires in actuators. *Solid state Phenomena.* 2006, Vol. 113, P. 195–198.

12. Zimin V. N., Krylov A. V., Shakhverdov A. O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures. *Journal of Physics: Conference Series 1902(1).* 2021, No. 1. P. 012115. DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012115.

13. Zimin V. N., Krylov A. V., Kuvyrkin G. N., Shakhverdov A. O. [Actuator made of a material with a shape memory effect for opening a transformable space structure]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii.* 2021, No. 4(348), P. 97–102 (In Russ.).

14. Zimin V. N., Krylov A. V., Shakhverdov A. O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures. *Journal of Physics: Conference Series 1902.* 2021, P. 012115.

15. Zimin V. N., Krylov A. V., Kuvyrkin G. N., Shakhverdov A. O. Mathematical and ground-based experiments when designing transformable space structures. *AIP Conference Proceedings 2503.* 2022, P. 020006.

© Зимин В. Н., Крылов А. В., Филиппов А. О., Шахвердов А. О., 2023

---

**Зимин Владимир Николаевич** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой космических аппаратов и ракет-носителей; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: zimin@bmstu.ru.

**Крылов Алексей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры космических аппаратов и ракет-носителей; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: kav1982@bmstu.ru.

**Филиппов Василий Сергеевич** – техник Отдела научно-технической информации Научно-исследовательского института специального машиностроения; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: vs.filippov@mail.ru.

**Шахвердов Артур Олегович** – ассистент кафедры космических аппаратов и ракет-носителей; Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет). E-mail: shah@bmstu.ru.

**Zimin Vladimir Nikolaevich** – Dr. Sc., senior scientific staff member, head of the department Spacecraft and launch vehicles; Bauman Moscow State Technical University (national research University). E-mail: zimin@bmstu.ru.

**Krylov Alexey Vladimirovich** – Cand. Sc., associate professor of the department Spacecraft and launch vehicles; Bauman Moscow State Technical University (national research University). E-mail: kav1982@bmstu.ru.

**Filippov Vasily Sergeevich** – technician of the Department of Scientific and Technical Information of Research Institute of Special Engineering; Bauman Moscow State Technical University (national research University). E-mail: vs.filippov@mail.ru.

**Shakhverdov Artur Olegovich** – assistant at the department Spacecraft and launch vehicles; Bauman Moscow State Technical University (national research University). E-mail: shah@bmstu.ru.

---