

## ТРАНСФОРМИРУЕМАЯ МАЧТА СОЛНЕЧНОГО ПАРУСА НА ОСНОВЕ ПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Б. П. ПАПЧЕНКО<sup>1</sup>, Д. К. ХЕГАЙ<sup>1</sup>, В. К. СЫСОЕВ<sup>2</sup>, А. Д. ЮДИН<sup>2</sup>  
А. И. ПРЯДКО<sup>3,4</sup>, С. А. ПУЛЬНЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: b.p.papchenko@gmail.com

<sup>2</sup>АО „НПО Лавочкина“, 141400, Химки, Московская обл., Россия

<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт  
робототехники и технической кибернетики, 194064, Санкт-Петербург, Россия

Представлен макет конструкции солнечного паруса, в котором применены монокристаллы Cu-Al-Ni со свойствами памяти формы для создания силовых элементов приводов, обеспечивающих раскрытие паруса. Рассмотрена конструкция мачты паруса и приведены физико-механические характеристики привода.

**Ключевые слова:** космический аппарат, солнечный парус, технология бестопливного движения, привод, материалы с эффектом памяти формы

**Введение.** Развитие технологии бестопливного двигателя для космических аппаратов семейства проектов „Солнечный парус“ связано с разработкой длинноразмерных трансформируемых конструкций с малыми массогабаритными характеристиками. Использование этой технологии позволит создать низкозатратные космические исследовательские проекты на основе наноспутников Cubesat [1—3]. Основой проекта „Солнечный парус“ является реализация технологии разворачивания в космическом пространстве светоотражающей полимерной пленки большой площадью (до 1000 м<sup>2</sup>), закрепленной на каркасе из радиально расположенных мачт. Такая конструкция должна быть доставлена на орбиту в сложенном компактном виде (занимающем наименьший возможный объем на борту космического корабля) и развернута в космическом пространстве в условиях невесомости в парус на мачтах, длина которых достигает 15 м.

Создание космических устройств подобного типа — это, прежде всего, отработка технологии бестопливного двигателя для космических аппаратов, а также развитие экспериментов по применению пленочных структур для исследований космических излучений [1—3]. Разработка таких аппаратов позволит решить следующие задачи:

- разворачивание несущих конструкций;
- создание малого космического аппарата, способного ориентировать пленочную структуру заданным образом;
- исследования по разворачиванию большеразмерных пленочных структур в условиях космического пространства;
- проверка взаимодействия пленочной структуры с космическим излучением;

- создание различных детекторов космического излучения, обладающих большой площадью и соответственно высокой чувствительностью [4, 5];
- освещение Земли в полярную ночь и темное время суток в полярных районах России;
- вывод с орбиты отработавших спутников за счет торможения об атмосферу Земли.

#### Примеры технических решений по реализации концепции солнечного паруса.

В АО „НПО Лавочкина“ был разработан проект солнечного паруса „Космос-1“ [3], в котором несущая конструкция создавалась надувными мачтами. Схема конструкции солнечного паруса представлена на рис. 1.

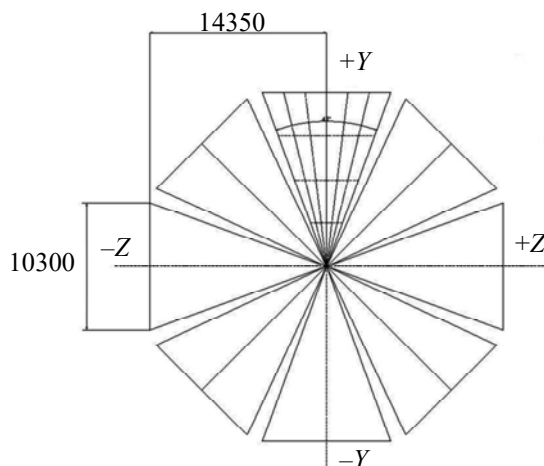


Рис. 1

Этот же способ на основе надувных мачт реализован в проекте LightSale-2, раскрывшем парус в июле 2019 г. Такая технология является наиболее простой в реализации, однако имеет несколько недостатков — большая масса и небольшой срок службы из-за микрометеоритного повреждения оболочки.

Другое решение использовано для американской автоматической межпланетной станции „Маринер-10“, где функцию паруса выполняли его солнечные батареи. Они были развернуты под определенным углом к Солнцу, чтобы скорректировать расположение аппарата в пространстве в тот момент, когда запас маневрового газа подошел к концу.

Успешным экспериментом с солнечным парусом была миссия японского спутника IKAROS. В ходе эксперимента удалось раскрыть два небольших тонкопленочных паруса. В результате вращения аппарата нагруженная пленка медленно распрямляется благодаря центробежной силе. Процесс раскрытия паруса занял семь дней.

В другом проекте — NanoSail-D2 (NASA) — парус был раскрыт всего за несколько секунд. Развертывание пленки проводилось с помощью металлических лент, которые раскручивались за счет упругости.

Таким образом, развертывание светоотражающих полимерных пленок в космосе может осуществляться различными способами: за счет надувных устройств и раскладывающихся механических устройств с помощью электроприводов, а также за счет центробежной силы и упругости металла.

Каждый из рассмотренных способов имеет свои преимущества и недостатки. Основным требованием к системам развертывания является минимизация массогабаритных характеристик и количества сервисных систем. Поэтому разработка более эффективных технических решений по конструкции солнечного паруса является актуальной задачей.

**Конструкция мачты солнечного паруса.** В данной статье рассматривается создание солнечного паруса на основе трубчатой конструкции мачт с использованием приводов из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ). Эффект памяти формы — это физическое явление, которое заключается в способности некоторых материалов за счет термоупругих мартенситных превращений восстанавливать в процессе нагрева свою первоначальную форму после

предварительного деформирования. Такие материалы обладают уникальными функциональными свойствами — способностью проявлять эффекты памяти формы и сверхупругости, а также генерировать напряжения [6—8]. На основе этих материалов возможно создание различных управляемых приводов для широкого спектра применений, в том числе для робототехнических систем [9—14].

В ходе реализации проекта рассматривались следующие конструкторско-технологические задачи: проектировочный расчет и конструирование мачты, выбор материала, обладающего эффектом памяти формы, разработка термомеханического привода, а также изготовление макета мачты.

В АО „НПО Лавочкина“ была спроектирована и изготовлена система обезвешивания, с помощью которой проведена серия экспериментов по раскрытию мачты, подтвердивших работоспособность и надежность конструкции.

В разработанной конструкции солнечного паруса для разворачивания его мачт применены термомеханические приводы на основе материалов с ЭПФ. Мачта сконструирована из материалов, обеспечивающих минимальный вес и устойчивых к воздействию вакуума и радиации, а также перепадам температуры до 300°С. Для проверки технических решений был разработан и изготовлен макет мачты солнечного паруса.

Макет мачты состоит из восьми секций, выполненных из тонкостенных стальных трубок и соединенных между собой приводами раскрытия. В сложенном состоянии габариты конструкции составляют 700×100×5 мм, в раскрытом состоянии длина мачты равна 5720 мм. Общая масса мачты при средней длине трубок 680 мм составляет 130 г, потребление энергии на раскрытие — 0,01 Вт·ч.

Схема привода раскрытия мачты солнечного паруса в сложенном состоянии показана на рис 2, а.

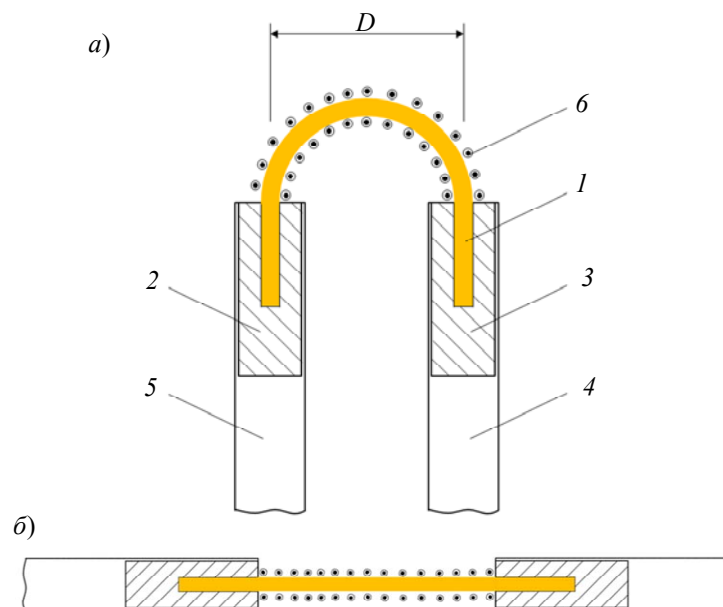


Рис. 2

Термомеханический силовой элемент 1 из монокристаллического прутка Cu-Al-Ni диаметром  $d=1$  мм в исходном состоянии имеет форму половины окружности диаметром  $D$ , при этом деформация предварительно заданного изгиба составляет  $\varepsilon = d/D$ . Силовой элемент установлен в две диэлектрические теплоизолирующие вставки 2 и 3, которые закреплены внутри трубок 4 и 5. На силовом элементе установлен спиральный электронагреватель 6 из нихромовой проволоки в электроизоляционной оболочке.

Привод раскрытия мачты в раскрытом состоянии показан на рис. 2, б.

Ниже приведены физико-механические характеристики привода.

Силовой элемент:

длина, мм .....	30
диаметр, мм .....	1
плотность материала, г/см <sup>3</sup> .....	8
теплоемкость, Дж/кг·К .....	418,68
генерируемые напряжения, МПа .....	до 200
обратимая деформация, % .....	9
масса, г .....	0,19

Трубка:

длина, мм .....	680
диаметр, мм .....	4
толщина стенки, мм .....	0,1
плотность стали, г/см <sup>3</sup> .....	7,8
масса, г .....	6,7

Вставка:

длина, мм .....	10
диаметр, мм .....	3,8
плотность материала, г/см <sup>3</sup> .....	2,1
масса, г .....	0,02

**Процесс раскрытия мачты.** В рамках данной работы был создан экспериментальный макет элемента мачты солнечного паруса длиной 5,7 м, состоящий из трубок из нержавеющей стали, приводов, фиксирующих элементов, кабеля и системы обезвешивания. Фотограмма раскрытия трубки мачты паруса показана на рис. 3.



Рис. 3

Время раскрытия в зависимости от силы тока составляет 10—60 с, прямолинейность мачты паруса зависит от точности системы обезвешивания. Мощность, затрачиваемая на раскрытие мачты, — 10 Вт. Было проведено более 20 циклов раскрытия мачты паруса, значительных отклонений от линейности мачты выявлено не было. Случаев нераскрытия мачты по каким-либо причинам не наблюдалось.

**Заключение.** Экспериментально подтверждена возможность создания мачты солнечного паруса на основе трубчатой конструкции с приводами из материалов с эффектом памяти формы. Подтверждены также технические характеристики макета — его масса, достаточность усилия ЭПФ, работоспособность узла фиксации и элемента нагрева. Показана эффективность применения материалов с ЭПФ и создана база для разработки других устройств, таких как радиоантенны, панели датчиков-приемников космических излучений, солнечные батареи.

Полученные данные могут служить основой для создания различных устройств исполнительных механизмов в космической технике. Анализ результатов экспериментальной обработки показал возможность уменьшения веса конструкции в два раза без снижения эксплуатационных свойств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов А. В. Пленочные отражатели в космосе. М.: Изд-во МГУ, 1977. С. 68.
2. Поляхова Е. Н. Космический полет с солнечным парусом. М.: Изд. гр. URSS, 2018.

3. Конструкция солнечного паруса (Космос-1) [Электронный ресурс]: <<http://galspace.spb.ru/orbita/parus.htm>>.
4. Пичхадзе К. М., Сысоев В. К., Царев В. А., Чечин В. А. Пленочные астрофизические космические конструкции // Краткие сообщения по физике: ж-л ФИАН. 2000. № 12. С. 9—13.
5. Гусев Г. А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М., Полухина Н. Г., Рябов В. А., Саито Т., Сысоев В. К., Фейнберг Е. Л., Царев В. А., Чечин В. А. Регистрация космических лучей и нейтриноультравысоких энергий радиометодом с использованием искусственных спутников Луны // Космические исследования. 2006. Т. 44, № 1. С. 22—42.
6. Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П. Эффект памяти формы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 218 с.
7. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы / Пер. с японск.: Под ред. Х. Фунакубо. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
8. Материалы с эффектом памяти формы. Справочное изд. / Под ред. В. А. Лихачева. СПб: НИИХ СПбГУ, 1990. 356 с.
9. Pulnev S. A., Nikolaev V. I., Malygin G. A., Kuzmin S. L., Shpeizman V. V., Nikanorov S. P. Generation and relaxation of reactive stresses in Cu-Al-Ni shape memory alloy // Tech. Phys. 2006. Vol. 51, N 8. P. 1004—1007.
10. Pryadko A., Chikiryaka A., Pulnev S. Simulation of operating a cyclic actuator based on a circular force element made of shape memory material // Tech. Phys. 2019. Vol. 64, N 4. P. 1785—1789.
11. Pryadko A., Chikiryaka A., Pulnev S. Simulation of operation of an actuator based on a flexural force element made of material with shape memory effect // Tech. Phys. 2019. Vol. 64, N 4. P. 506—511.
12. Pulnev S., Pryadko A., Yastrebov S., Nikolaev V. Shape memory effects in Cu-Al-Ni single crystals and linear and rotary engines on their basis // Tech. Phys. 2018. Vol. 63, N 6. P. 817—823.
13. Pulnev S., Nikolaev V., Priadko A., Rogov A., Viahhi I. Actuators and drives based on Cu-Al-Ni shape memory single crystals // Proc. SMST-2010, Pacific Grove, California, USA. 2010. P. 497—499.
14. Pulnev S., Chikiryaka A., Nikolaev V., Pryadko A. Miniature robot with actuators based on Cu-Al-Ni shape memory single crystal // Intern. Conf. on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), Nagoya, Japan, 4—8 July 2018. P. 18.

**Сведения об авторах**

- Борис Петрович Папченко** — Университет ИТМО, научно-технический отдел кафедры лазерных технологий и лазерной техники, зам. начальника;  
E-mail: b.p.papchenko@gmail.com
- Дмитрий Климович Хегай** — канд. техн. наук; ст. научный сотрудник; Университет ИТМО, департамент оборонных и двойных технологий; директор;  
E-mail: hdk\_itmo@mail.ru
- Валентин Константинович Сысоев** — д-р техн. наук; АО „НПО Лавочкина“, отдел научно-исследовательских работ и перспективных исследований; начальник отдела; E-mail: sysoev@laspace.ru
- Андрей Дмитриевич Юдин** — АО „НПО Лавочкина“, отдел научно-исследовательских работ и перспективных исследований; инженер-конструктор;  
E-mail: yudin@laspace.ru
- Алексей Иванович Прядко** — ЦНИИ РТК; ведущий конструктор; E-mail: airprdko@mail.ru
- Сергей Аполлонович Пульнев** — Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; ст. научный сотрудник, E-mail: pulsar11@mail.ru

Поступила в редакцию  
08.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Папченко Б. П., Хегай Д. К., Сысоев В. К., Юдин А. Д., Прядко А. И., Пульнев С. А. Трансформируемая мачта солнечного паруса на основе приводов из материалов с эффектом памяти формы // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 1. С. 71—76.

**TRANSFORMABLE SOLAR SAIL MAST  
BASED ON DRIVES MADE OF SHAPE MEMORY MATERIALS**

**B. P. Papchenko<sup>1</sup>, D. K. Khegay<sup>1</sup>, V. K. Sysoev<sup>2</sup>, A. D. Yudin<sup>2</sup>  
A. I. Pryadko<sup>3,4</sup>, S. A. Pulnev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: b.p.papchenko@gmail.com*

<sup>2</sup>*JSC Lavochkin Association, 141400, Khimki, Moscow region, Russia*

<sup>3</sup>*Ioffe Institute, 194021, St. Petersburg, Russia*

<sup>4</sup>*Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics,  
194064, St. Petersburg, Russia*

A model of the "Solar Sail" design is presented, in which Cu-Al-Ni single crystals with shape memory properties are used to create power elements of drives that ensure the opening of the sail. The design of the sail mast is considered, and the physical and mechanical characteristics of the drive are presented.

**Keywords:** spacecraft, solar sail, fuel-free motion technology, drive, shape memory materials

**REFERENCES**

1. Lukyanov A.V. *Plenochnyye otrazhateli v kosmose* (Film Reflectors in Space), Moscow, 1977, 68 p. (in Russ.)
2. Polyakhova E.N. *Kosmicheskii polet s solnechnym parusom* (Space Flight with Solar Sail), Moscow, 2018, 320 p. (in Russ.)
3. <http://galspace.spb.ru/orbita/parus.htm>. (in Russ.)
4. Pichkhadze K.M., Sysoev V.K., Tsarev V.A., Chechin V.A. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2000, no. 12, pp. 9–13.
5. Gusev G.A., Lomonosov B.N., Polukhina N.G., Ryabov V.A., Feinberg E.L., Tsarev V.A., Chechin V.A., Pichkhadze K.M., Sysoev V.K., Saito T. *Cosmic Research*, 2006, no. 1(44), pp. 19–38. (in Russ.)
6. Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. *Effekt pamyati formy* (Shape Memory Effect), Leningrad, 1987, 218 p. (in Russ.)
7. Otsuka K., Wayman C.M., ed., *Shape memory materials*, Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
8. Likhachev V.A., ed., *Materialy s efektom pamyati formy. Spravochnoye Izdaniye* (Shape Memory Materials. Reference Edition), St. Petersburg, 1990, 356 p. (in Russ.)
9. Pulnev S.A., Nikolaev V.I., Malygin G.A., Kuzmin S.L., Shepizman V.V., Nikanorov S.P. *Tech. Phys.*, 2006, no. 8(51), pp. 1004–1007.
10. Pryadko A., Chikiryaka A., Pulnev S. *Tech. Phys.*, 2019, vol. 64, pp. 1785–1789.
11. Pryadko A., Chikiryaka A., Pulnev S. *Tech. Phys.*, 2019, no. 4(64), pp. 506–511.
12. Pulnev S., Pryadko A., Yastrebov S., Nikolaev V. *Tech. Phys.*, 2018, no. 6(63), pp. 817–823.
13. Pulnev S., Nikolaev V., Priadko A., Rogov A., Viahhi I. *SMST-2010. Pacific Grove, California, USA, 2010*, pp. 497–499.
14. Pulnev S., Chikiryaka A., Nikolaev V., Pryadko A. *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, Nagoya, Japan, July 04–08, 2018, p. 18.

**Data on authors**

- Boris P. Papchenko** — ITMO University, Department of Laser Technologies and Systems; Deputy Head of Scientific and Technical Section; E-mail: b.p.papchenko@gmail.com
- Dmitry K. Khegay** — PhD; Senior Scientist; ITMO University, Department of Defense and Dual Technologies; Director; E-mail: hdk\_itmo@mail.ru
- Valentin K. Sysoev** — Dr. Sci.; JSC Lavochkin Association, Department of Research and Development and Advanced Research; Head of the Department; E-mail: sysoev@laspaces.ru
- Andrey D. Yudin** — JSC Lavochkin Association, Department of Research and Development and Advanced Research; Design Engineer; E-mail: yudin@laspaces.ru
- Alexey I. Pryadko** — Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics; Leading Designer; E-mail: aiprdko@mail.ru
- Sergey A. Pulnev** — Ioffe Institute; Senior Scientist, E-mail: pulsar11@mail.ru

**For citation:** Papchenko B. P., Khegay D. K., Sysoev V. K., Yudin A. D., Pryadko A. I., Pulnev S. A. Transformable solar sail mast based on drives made of shape memory materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 1. P. 71–76 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-71-76