

УДК 621.981.12

РАЗРАБОТКА РЕВЕРСИВНЫХ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В УЗЛАХ РАСЧЕКОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2011 В. А. Барвинок, В. И. Богданович, О. В. Ломовской, М.А. Вишняков, А. А. Грошев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 12.05.2011

Разработана математическая модель и инженерная методика проектирования силовых приводов малого поперечного сечения из сплава с эффектом памяти формы. Разработан, изготовлен и испытан безинерционный силовой привод на базе эффекта памяти формы, предназначенный для работы в составе узла расчеховки космического аппарата. Лабораторными испытаниями установлена стабильная реверсивная работа силового привода.

Ключевые слова: реверсивный силовой привод, материалы с эффектом памяти формы, математическая модель.

Подавляющее количество металлических и неметаллических материалов, предназначенных для различных сфер деятельности, используется в качестве конструкционных для изготовления машин общего и специального назначения.

Существует группа материалов с особыми физико-техническими характеристиками, являющаяся группой функциональных материалов. Ярким представителем функциональных материалов является группа сплавов с термоупругими мартенситными превращениями и термомеханической памятью – материалы, обладающие эффектом памяти формы (ЭПФ).

Проявляемый интерес к таким материалам связан с особым комплексом физико-механических свойств, который открывает широкие перспективы применения их в технике, позволяя создавать элементы и устройства с принципиально новыми функциональными свойствами [1]. Важным направлением прикладных исследований в области применения материалов с ЭПФ

является создание на их основе силовых термо-механических приводов [2].

Большие перспективы применения таких приводов имеются при создании устройств, применяемых в конструкции космических аппаратов (КА). Наиболее рационально использовать материалы с ЭПФ в силовом приводе с ЭПФ в конструкции захватов, замков, толкателей, саморазворачивающихся антенн, солнечных батарей и т.п., в механизмах ориентации солнечных батарей. Применение данных приводов рационально при создании механизированных инструментов для монтажных работ в условиях открытого космоса (гайковерты, устройства для соединения цилиндрических деталей и элементов конструкций, самозатягивающиеся обоймы и муфты, зажимы, развальцеватели, фланцевые соединения и т.д.), при разработке силовых болтов и шпилек, приводов поворотных механизмов (рули, заслонки, люки и т.д.), крепежных элементов, манипуляторов [3-7]. Устройства с силовым приводом с ЭПФ не создают импульсных нагрузок на элементы конструкции космических аппаратов и не вносят дополнительных возмущений в его положение.

В основе ЭПФ большинства сплавов лежат так называемые термоупругие мартенситные превращения (ТУМП). Теория мартенситных превращений основывается на фундаментальных представлениях о закономерном характере перестройки кристаллической решетки и когерентности сосуществующих фаз аустенита (А) и мартенсита (М), сформулированных Г.В. Курдюмовым (высокотемпературную фазу принято называть аустенитом, а низкотемпературную — мартенситом) [8].

Барвинок Виталий Алексеевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Богданович Валерий Иосифович, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: bogdanovich@ssau.ru.

Ломовской Олег Владиславович, ассистент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Вишняков Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Грошев Александр Анатольевич, аспирант

Суть проявления ЭПФ заключается в следующем [1, 8]. Материал, обладающий этим эффектом, пластически деформируют в А фазе при температуре T , большей температуры M_n начала прямого мартенситного превращения с целью придания ему некоторой определенной формы, например, выпрямляют и вытягивают проволоку. Затем проволока охлаждается ниже температуры M_k конца прямого мартенситного превращения и в М фазе ее деформируют в спираль. При последующем нагреве спирали выше температуры A_k завершения обратного мартенситного превращения ($A_k > M_n$ из-за гистерезиса кривой деформация-температура при прямом и обратном мартенситном превращении) она самопроизвольно выпрямляется.

Научно-исследовательская работа по изучению перспектив применения материалов с эффектом памяти формы в качестве силового привода исполнительных механизмов на базе разработанного в СССР сплава ТН-1 проводится на кафедре ПЛА и УКМ с начала 80-х годов XX века по настоящее время.

Это обусловлено тем, что наиболее ярко ЭПФ выражен в сплаве ТН-1, или как его называют никелид титана или нитинол. Данный сплав нашел самое широкое применение в машиностроение из-за своих физико-механических свойств, обеспечивающих его удачное применение на практике. Никелид титана – сплав эквиатомного состава с 55 мас. % Ni имеет температуру плавления 1240-1310 °С, плотность 6,45 г/см³ [8].

В результате проведенных исследований были изучены деформационно-силовые характеристики сплава ТН-1 и разработана методика его термосиловой подготовки на определенную величину деформации памяти формы, при которой в период обратного мартенситного превращения силовой элемент генерирует максимальные напряжения. Это позволило разработать одноразовые малогабаритные устройства (масса 0,12 кг и габаритными размерами 130x70x30 мм) для испытания материалов на растяжение (развиваемое усилие до 5кН) в условиях экспонирования в открытом космическом пространстве в специальном контейнере, выводимом в космос в составе низкоорбитального космического аппарата [9]. Были проведены также исследования влияния экспонирования силовых элементов в космическом пространстве на сохранение в нем деформаций и напряжений памяти формы. Было установлено, что экспонирование приводит к увеличению деформационных характеристик до 20%.

Исследования стержневого силового элемента, прошедшего термосиловую подготовку показали, что после каждого цикла выполнения им механической работы происходит уменьшение

величины остаточной деформации при стабилизации деформации памяти формы. Этот эффект и предопределил известные примеры применения материала с памятью формы в одноразовых устройствах. В середине 80-х годов на кафедре ПЛА и УКМ была сформулирована гипотеза о том, что если с помощью дополнительного устройства удастся реализовать ситуацию, при которой силовой элемент после выполнения механической работы в процессе последующего охлаждения и перехода в начальное состояние будет совершать работу против внешних сил растяжения со стороны этого дополнительного устройства, то остаточная деформация может быть устранена, и силовой одноразовый элемент может быть превращен во многообразовый.

Сформулированная гипотеза получила экспериментальное подтверждение, что впервые в мировой практике позволило разработать малогабаритный (180x90x70мм) многообразового действия пресс (максимальное усилие 15 кН), содержащий трубчатый силовой элемент из материала с ЭПФ нагреваемый электрической спиралью и охлаждаемый сжатым воздухом [5].

Разработанный многообразовый силовой привод был использован в качестве экспериментального стенда для исследования закономерностей протекания деформационно-силовых процессов при многоцикловом нагружении силового элемента. На основании проведенных экспериментальных исследований, а также имеющихся результатов исследования микроструктуры материала при упругих мартенситных превращениях были разработаны теоретические основы проектирования силовых элементов многообразового действия.

На основании проведенных исследований была разработана методика проектирования и технология изготовления уникального силового привода с эффектом памяти формы, способного совершать $10^6 \dots 10^7$ рабочих циклов при деформации памяти формы (5-8%) с преодолением значительных внешних нагрузок [2].

На базе проведенных исследований, разработаны и изготовлены макетные образцы малогабаритного механизированного ручного инструмента, предназначенного для работы в открытом космосе [7]. Данный инструмент создан для проведения разделительных, монтажных и ремонтных работ на космической орбите.

Накопленный опыт был применен для создания силового привода из сплава с ЭПФ предназначенного для использования в конструкции узла расчеховки гибких тяг для расфиксации подвижных элементов конструкции малых космических аппаратов с целью исключения ударных нагрузок в процессе расфиксации. Созданный силовой привод многообразового использова-

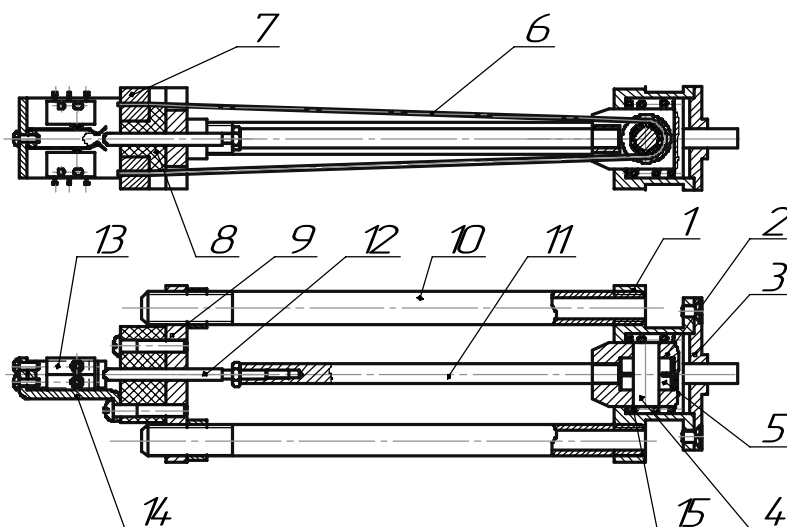


Рис. 1. Схема силового привода из сплава с ЭПФ для узла расчеховки КА:

1 – корпус, 2 – ползун, 3 – крышка, 4 – ось, 5 – ролик, 6 – силовой элемент из сплава с ЭПФ, 7 – упор, 8 – диэлектрическая площадка, 9 – траверса, 10 – стойка, 11 – тяга, 12 – шток, 13 – система концевых выключателей, 14 – кронштейн, 15 – силовой возвратный привод

ния, что позволяет провести его наземную обработку на одном экземпляре, и тем самым обеспечить его надежное функционирование при выполнении решаемой задачи.

В разработанном силовом приводе узла расчеховки применен силовой элемент изготовленный из проволоки ТН-1 нагреваемой в процессе работы путем пропускания через него электрического тока.

Схема разработанного силового привода из сплава с ЭПФ представлена на рис. 1.

Проведенные патентные исследования показали, что разрабатываемая чека с силовым приводом из сплава с ЭПФ по своим параметрам имеет технический уровень не ниже аналогов, а по показателю трудоемкости отработки и испытаний превосходит известные аналоги.

Для успешного внедрения силового привода с ЭПФ в созданном устройстве проведена модернизация существующей методики проектирования силового элемента из сплава с ЭПФ путем уточнения и детализации существующей математической модели функционирования силового элемента с ЭПФ.

При разработке математической модели силовой элемент рассматривался как термоциклированная струна из сплава с ЭПФ. Струна является нормально растянутой, и расчеховка обеспечивается рабочим ходом на сжатие при нагреве до температуры аустенит мартенситного джоулевым теплом, выделяющемся при пропускании электрического тока непосредственно через струну.

Время срабатывания силового элемента определяется временем его прогрева до температуры окончания обратного мартенситного превращения с учетом расчетных эксплуатационных

напряжений.

В свою очередь, это время определяется тепловой мощностью внешнего электрического источника с учетом тепловых потерь в местах концевой заделки струны. Теплообмен на боковой поверхности силового элемента в виде струны в условиях открытого космоса возможен только путем излучения, и, будучи ничтожным, в температурном диапазоне 20...200°С, может не приниматься во внимание.

Данная физическая схема в математической формулировке соответствует типовой краевой задаче III рода для неоднородного уравнения теплопроводности, поскольку концевая заделка силового элемента представляет собой соединение струны малого диаметра с элементами конструкции со значительной массой, а, следовательно, со значительной абсолютной теплоемкостью. Однако существенным отличием является эндотермичность реакции фазового превращения (аустенит мартенситный переход сопровождается значительным поглощением тепла, что в литературе часто трактуется как “скачек теплоемкости” в температурном диапазоне фазового перехода [10]). Теплоемкость аустенитной и мартенситной фаз различается незначительно и принималась постоянной, усредненной.

Наличие эндотермической реакции интерпретировалось как отрицательный тепловой источник (сток), нормально зависящий от температуры (используется закон нормального распределения Гаусса):

$$q_1[T(t)] = -\frac{W_1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

где W_1 – тепловая мощность фазового превращения, истинно равная площади под кривой в координатах $C(T), T$;

μ – средняя точка температурного интервала фазового превращения;

6σ – ширина температурного интервала фазового превращения.

Рассматриваемый силовой элемент характеризуется следующим набором параметров:

$2l$ – длина;

d – диаметр;

C – теплоемкость сплава ТН-1;

γ – плотность сплава ТН-1;

λ – коэффициент теплопроводности сплава ТН-1;

α – коэффициент теплообмена в концевой заделке;

ρ – удельное электрическое сопротивление сплава ТН-1;

U – напряжение внешнего электрического источника.

В качестве исходного соотношения принималось решение краевой задачи теплопроводности при отсутствии теплового стока [11]:

$$T_0(\xi, F_0) = \frac{w_0 l^2}{2\lambda} \left\{ 1 - \xi^2 + \frac{2}{Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n^2} \cdot \cos(\mu_n \xi) e^{-\mu_n^2 F_0} \right\}, \quad (2)$$

где $w_0 = \varepsilon \frac{U^2 d}{2\rho lc}$ – тепловая мощность, выделяемая при пропускании электрического тока;

$\xi = \frac{x}{l}$ – относительная осевая координата;

$F_0 = \frac{\lambda t}{c\gamma l^2}$ – критерий Фурье (относительное время);

$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – критерий Био (относительная интензивность теплоотвода в концевой заделке, а

коэффициент теплообмена с окружающей средой – элементами конструкции силового привода, l – коэффициент теплопроводности материала с ЭПФ);

$\mu_n, n = 1, 2, \dots$ – ряд корней характеристического уравнения краевой задачи $\mu_n \operatorname{ctg}(\mu_n) = \frac{1}{Bi}$;

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi\sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n(Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} - \text{начальные температурные амплитуды.}$$

Распределение температуры по длине силового элемента с учетом поглощения теплоты фазового превращения найдено методом интегрального преобразования:

$$T(\xi, F_0) = \frac{l^2}{2\lambda} \int_0^{F_0} \nu(\xi, \tau) \cdot \left[w_0 - \frac{w_1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(w_0 \int_0^\tau \nu(\xi, s) ds - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \right] d\tau, \quad (3)$$

где $\nu(\xi, F_0) = \frac{\partial T_0(\xi, F_0)}{\partial F_0}$.

Соотношение (3) позволяет численно получить и исследовать имитационную модель температурного поля силового элемента, которое однозначно для силового элемента с малым поперечным сечением позволило моделировать все протекающие в нем физические процессы.

Так как многие физико-механические характеристики материала, обладающего эффектом памяти формы, являются функциями от температуры, то для успешного численного моделирования необходимо иметь данные зависимости в аналитическом виде. Это проводится путем подбора аппроксимирующих зависимостей.

Для определений перемещений силового элемента с ЭПФ, использовалась разработанная в СГАУ аппроксимирующая зависимость деформации памяти формы (структурной деформации) от температуры.

В процессе работ были уточнены деформационно-силовые зависимости для образцов, выполненных из проволоки ТН-1. Исходя из анализа формы экспериментальной зависимости, модельная зависимость структурной деформации фазового превращения от температуры аппроксимировалась кусочно-линейным способом и принималась в виде:

$$\beta(T) = \begin{cases} 0, & T < A_n \\ \beta_0 \frac{T - A_n}{A_k - A_n}, & A_n \leq T \leq A_k \\ \beta_0, & T > A_k \end{cases}, \quad (4)$$

где β_0 – предельная величина структурной деформации;

T – текущая температура в точке силового элемента, определяется по соотношению (3);

A_n – температура начала обратного мартенситного превращения;

A_k – температура конца обратного мартенситного превращения.

Соотношение (3) позволяет получить имитационную модель температурного поля силового



Рис. 2. Опытный образец силового привода из сплава с ЭПФ для узла расчеховки КА

го элемента и отследить характеристики силового элемента из сплава с ЭПФ от варьирования входных параметров (l, d, U).

Перемещение памяти формы силового элемента единичной длины h , определялось путем интегрирования по длине силового элемента структурной деформации:

$$h = \frac{1}{2} \int_0^1 \beta [T(\xi, F_0)] d\xi. \quad (5)$$

Для проведения расчетов, по результатам теоретических исследований, разработана программа для системы MathCAD.

Использование усовершенствованной модели позволило сократить время и материальные затраты на экспериментальные исследования при выборе рациональных схем термомеханического нагружения с целью оптимального проектирования силового элемента с ЭПФ в соответствии с поставленным техническим заданием.

Проведенные теоретические и экспериментальные (по проверке адекватности разработанной модели) исследования позволили значительно усовершенствовать (упростить) существующую методику проектирования силовых элементов из сплава с ЭПФ для устройств, приводящих элементы конструкции космического аппарата в рабочее положение на орбите.

Разработанная инженерная методика была использована при проектировании силового привода предназначенного для работы в составе узла расчеховки космического аппарата. Изготовлены опытные образцы силового привода из сплава с ЭПФ, представленные на рис. 2.

Проведены лабораторно – отработочные испытания созданных образцов силового привода из сплава с ЭПФ, выполненного из проволоки ТН-1.

В результате испытаний определены следу-

ющие параметры процесса работы силового привода из сплава с ЭПФ в режиме холостого хода:

Перемещение ползуна $\Delta l = 4,1 \pm 0,05$ мм;

Температура силового элемента в начале рабочего хода $T_n = 70 \pm 2^\circ\text{C}$;

Температура силового элемента в начале рабочего хода $T_k = 140 \pm 10^\circ\text{C}$;

Время совершения рабочего хода $t = 30$ секунд.

Результаты испытаний подтвердили стабильную многоцикловую работу созданного силового привода из сплава с ЭПФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки и др. [под ред. Фунакубо Х]. Пер. с японск. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
2. Физические основы моделирования и проектирования реверсивных силовых приводов из материала с эффектом памяти формы / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, В.С. Феоктистов. М.: Международный центр научной и технической информации, 1997. 72 с.
3. Малогабаритное оборудование и инструмент с силовым приводом из сплава с памятью формы, предназначенные для выполнения ремонтно-монтажных работ / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, В.С. Феоктистов, О.В. Ломовской // Проблемы космической технологии металлов. Труды ИЭС им. Патона. Киев: ИЭС им. Патона, 1987. С.99-103.
4. А.с. СССР 1408673, МКИ³ F03G7/06 Устройство для сварки / И.Ф. Костенко, О.В. Ломовской, В.И. Баженов, В.В. Макухин, В.С. Феоктистов (СССР). № 4147552; заявл. 17.11.86; не опубли.
5. А.с. СССР 1426844, МКИ³ B30B13/00, 15/34. Пресс для штамповки / Феоктистов В.С. Лизунов М.Ф., Федотов Ю.В., Ломовской О.В., Краснов В.Г., (СССР). - № 4219319; заявл. 11.06.88; опубли. 30.09.88, Бюл. № 36. 2 с.
6. А.с. СССР 1530836, МКИ³ B30B13/00, 15/34. Силовой замок-фиксатор / О.В. Ломовской, В.С. Феоктистов, Ю.В. Федотов, И.Ф. Костенко, В.И. Баженов, В.В. Макухин, В.О. Солдатенков, С.Б. Горлов, А.Ф. Полещук, (СССР). № 4327106; заявл. 09.11.87; опубли. 23.12.89, Бюл. № 47. 3 с.

7. А.с. СССР 1558579, МКИ³ В23D29/00. Ножницы / Ломовской О.В., Богданович В.И., Феоктистов В.С., Козлов Ю.А., Полещук А.Ф., Солдатенков В.О., Горлов С.Б., (СССР). - № 4353046; заявл. 30.12.87; опубл. 23.04.90, Бюл. № 15. 3 с.
8. Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти формы / И.И. Корнилов О.В. Белоусов, Е.В. Качур. М.: Наука, 1977. 179 с.
9. Рассказов П.В., Барвинок В.А., Феоктистов В.С., Дунаев А.Н. и др. Малогабаритное испытательное устройство с силовым элементом из сплава ТН-1 // Производственно-технический опыт. 1986. №3. С.38-40.
10. Исследование процесса нагрева силового элемента из сплава с эффектом памяти формы / В.А. Барвинок, О.В. Ломовской, В.И. Богданович // Проблемы машиностроения и автоматизации. 1995. №1-2. С. 52-54.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

DEVELOPMENT OF REVERSIBLE POWER DRIVES FROM MATERIALS WITH THE EFFECT OF MEMORY OF FORM FOR DEVICES, APPLIED IN THE KNOTS OF CHECK OFF OF SPACE VEHICLES

© 2011 V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, O.V. Lomovsky, M.A. Vishnyakov, A.A. Groshev

Samara State Aerospace University

A mathematical model and an engineering method of designing actuators for small transverse cross-section of an alloy with shape memory. Designed, manufactured and tested inertialess actuator based on shape memory effect, designed for operation in the host check off outer unit. Laboratory tests established a stable reversible work of the actuator.

Key words: reversible power drive, materials with the effect of memory of form, mathematical model

Vitaly Barvinok, Corresponding Member of RAS, Doctor of Technics, Professor, Head at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

E-mail: barvinok@ssau.ru.

Valery Bogdanovich, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: bogdanovich@ssau.ru.

Oleg Lomovsky, Assistant Lecturer at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department..

Michael Vishnyakov, Doctor of Technics, Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. E-mail: barvinok@ssau.ru.

Alexander Groshev, Graduate Student.