

УДК 629.7.062

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

© 2013 В.А. Барвинок, В.И. Богданович, А.А. Грошев, А.Н. Плотников, О.В. Ломовской

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 01.12.2013

В данной статье изложена конструкция силового привода из сплава с эффектом памяти формы, предназначенного для работы в составе узла расчеховки, представлена методика проектирования данного привода, основанная на разработанной феноменологической математической модели. Ключевые слова: космический аппарат, узел расчеховки, силовой привод с эффектом памяти формы, методика проектирования, математическая модель.

Актуальной проблемой развития ракетно-космической техники является увеличение надежности ракет-носителей и космических аппаратов за счет повышения качества выполняемых работ, как в производственных, так и в условиях открытого космоса, путем механизации ряда наиболее ответственных технологических процессов, а также за счёт создания высоконадёжных узлов бортовых систем летательных аппаратов. Эта задача может быть решена на основе применения материалов с особыми характеристиками в конструкции технологического оснащения и в конструкции узлов бортовых систем.

В настоящее время известны материалы с особыми физико-механическими свойствами – материалы, обладающие термомеханическим эффектом памяти формы (ЭПФ). Применение данных материалов в качестве силового привода многоразового действия эффективно 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 и т.д.), при разработке приводов различных механизмов бортовых систем (устройства расфиксации, манипуляторы, рулевые машинки, приводы заслонок, люков и т.д.) [1-5].

В настоящей статье отражен опыт разработки силового привода многоразового действия на основе ЭПФ выполненной в рамках проведённой на кафедре ПЛА и УКМ СГАУ НИОКР, предназначенного для использования в конструкции узла расчеховки гибких тяг фиксирующих подвижные элементы конструкции малых космических аппаратов. Применение указанного привода позволяет исключить ударные нагрузки на элементы космического аппарата в процессе расфиксации, которые возникают при использовании пиротехнического привода расчеховки. К тому же возможность многоразовой работы данного привода позволяет обеспечить требуемую надёжность при минимальном дублировании за счёт возможности проведения необходимого числа циклов испытаний, при его отработке [6]. Пиротехнический привод расчеховки функционирует однократно, и необходимая степень надёжности обеспечивается за счёт многократного дублирования, что приводит к увеличению массы его конструкции.

Для успешного применения силовых приводов с ЭПФ в разрабатываемых устройствах необходимо расширение их номенклатуры, определяемой формой силового элемента, видом его напряженно-деформированного состояния а также функциональными возможностями силовых элементов из материала с ЭПФ, применяемых в данных приводах. Так, например, в разработанном силовом приводе силовой элемент из сплава с ЭПФ имеет форму струны, работающей в условиях осевого растяжения-сжатия. Для создания данного привода проведена модернизация существующей методики проектирования силового элемента из сплава с

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

Грошев Александр Анатольевич, аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Плотников Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

Ломовской Олег Владиславович кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.

ЭПФ [7] за счёт уточнения и детализации существующей математической модели функционирования силового элемента с ЭПФ путём аналитической аппроксимации имеющихся и вновь полученных экспериментальных данных.

Разработанная методика проектирования силового привода с ЭПФ многократного использования содержит проектировочный и поверочный расчеты силового элемента с ЭПФ, а также подбор силового возвратного привода.

Проектировочный расчет заключается в следующем.

Выбирают материал силового элемента. Опыт создания устройств с силовым приводом из сплава с ЭПФ показал, что наиболее подходящим из известных сплавов с ЭПФ для изготовления силового элемента является сплав марки ТН-1 с температурой начала обратного мартенситного превращения A_n более 80°C . В настоящее время в РФ промышленный центр «МАТЭКС» выпускает полуфабрикаты из сплава данной марки. Данное предприятие выпускает слитки, диаметром 110 мм, прутки горячекатаные, диаметром 10 - 50 мм, прутки кованные, диаметром 5 - 15 мм, проволоку кованую, диаметром 2 - 5 мм, проволоку волоченую, диаметром 0,1 - 3 мм.

Далее определяется площадь поперечного сечения силового элемента.

Площадь поперечного сечения A , для силового элемента работающего на растяжение-сжатие должна быть не менее величины, определенной по формуле:

$$A = \frac{F}{[\sigma] - \sigma_2}, \quad (1)$$

где F – величина эксплуатационного усилия;

$[\sigma]$ – предельные эксплуатационные напряжения;

σ_2 – напряжения, вызванные действием силового возвратного привода, обеспечивающего многоцикловую работу силового элемента, работающего на растяжение-сжатие в конце его рабочего хода.

Известно, что одним из условий многоциклового работы силового элемента из сплава с ЭПФ является сохранение когерентности кристаллической решетки на границе зерен низкотемпературной и высокотемпературной фаз материала [7]. Это выполняется при непревышении интенсивности напряжений вызванными рабочими нагрузками предела текучести $y_{0,2}$ материала силового элемента. Так, для материала ТН-1 $y_{0,2} \approx 300$ МПа. Поэтому принимают уровень расчетных эксплуатационных напряжений не более предела текучести $y_{0,2}$ материала силового элемента. Также по данным работы [8] известно, что предел выносливости никелида титана на базе

10^5 циклов составляет $210 \div 270$ МПа. Так, например, из условий обеспечения требуемой степени надежности устройства расчеховки ресурс разрабатываемого устройства должен составлять не менее 10^2 циклов. Рекомендуемый уровень предельных эксплуатационных напряжений в силовом элементе должен составлять 250 МПа – ближе к верхней границе диапазона напряжений и не выше предела текучести для ТН-1.

Определяется длина силового элемента.

Длина рабочей части вычисляется исходя из величины требуемого перемещения силового элемента Δl путем деления на соответствующее значение эксплуатационной деформации памяти формы. Для силового элемента, работающего на растяжение или сжатие против внешних нагрузок длина его рабочей части определяется по формуле:

$$L = \frac{\Delta l}{\beta_{\text{растяж-сж}}}, \quad (2)$$

где $\beta_{\text{растяж-сж}}$ – структурная деформация фазового превращения.

С учетом предельных эксплуатационных напряжений, принятых ранее, по полученным экспериментально деформационно-силовым зависимостям для материала с ЭПФ определяется величина деформации памяти формы. Для материала ТН-1 она может составлять 7...10% - при работе силового элемента на растяжение-сжатие [7].

Далее проводится подбор силового возвратного привода, который обуславливает циклическую работу силового элемента со стабильными параметрами. Подбор силового возвратного привода проводится путем расчета упругого элемента, например пружины, с согласованием его параметров с характеристиками силового элемента из сплава с ЭПФ.

Экспериментально установлено, что для сплава с ЭПФ условием его цикловой работы является создание в сечении силового элемента механических напряжений определенного значения в начале и в конце его рабочего хода.

Опыт создания на кафедре ПЛА и УКМ СТАУ устройств с силовым приводом из сплава с ЭПФ показал, что при совместной работе силового элемента из сплава с ЭПФ с силовым возвратным приводом в виде упругого элемента, например, пружины в процессе их совместной работы происходит «стабилизация» амплитуды перемещений памяти формы силового элемента в течение первых 5...10 рабочих циклов. При этом величина «стабилизированной» амплитуды перемещений памяти формы силового элемента соответствует жесткости силового возвратного привода. Установлены оптимальные значения усилий силового возвратного привода, действующие на силовой элемент с ЭПФ, которые обес-

печивают максимальную амплитуду перемещений памяти формы силового элемента. Так для обеспечения максимальных перемещений памяти формы для силового элемента из сплава марки ТН-1 в случае силового элемента, работающего со сжимающими деформациями фазового превращения осевые напряжения в начале рабочего хода s_1 должны составлять 2.0...2.5 кг/мм² (20...25 МПа) и 5.5...6.0 кг/мм² (55...60 МПа) – в конце рабочего хода s_2 .

С учетом вышесказанного, рабочие усилия силового возвратного привода в начале рабочего хода P_1 и конце рабочего хода P_2 могут быть вычислены по формулам:

$$\begin{aligned} P_1 &= A\sigma_1, \\ P_2 &= A\sigma_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Вычисленные значения усилий силового возвратного привода по формулам (3) используются для подбора, например, возвратной пружины по известным методикам.

Подбираются параметры источника питания, предназначенного для нагрева силового элемента с ЭПФ.

В разработанном силовом приводе нагрев силового элемента осуществляется путём пропускания через его сечение электрического тока. При проектировочном расчете допускается, что нагрев силового элемента происходит за счет выделения тепла в сечении силового элемента от внутренних источников при полном отсутствии теплообмена на наружной поверхности силового элемента. При этом не учитывается изменение удельного сопротивления и теплоемкости силового элемента в процессе нагрева.

Параметры источника питания для нагрева силового элемента определяются из условия обеспечения заданного времени его срабатывания t – времени нагрева от начальной температуры T_0 до температуры конца обратного мартенситного превращения A_k при эксплуатационных напряжениях материала ТН-1. Для сплава ТН-1 при $s_s = 200...250$ МПа $A_k = 170^\circ\text{C}$.

Мощность источника питания P определяется из условия теплового баланса при принятых выше допущениях:

$$Pt = C_p \gamma V (A_k - T_0), \quad (4)$$

$$P = \frac{C_p \gamma V (A_k - T_0)}{t}, \quad (5)$$

где C_p – удельная теплоемкость материала ТН-1; γ – плотность материала ТН-1;

V – объём силового элемента с ЭПФ, который определяется в свою очередь, по формуле:

$$V = A \times L, \quad (6)$$

где A и L – рассчитанные соответственно площадь

и длина силового элемента с ЭПФ.

Далее по параметрам подбирается соответствующий по мощности источник питания. Напряжение источника питания U , согласно закону Ома определяется по формуле:

$$U = \sqrt{P \times R}, \quad (7)$$

где P – мощность источника питания;

R – электрическое сопротивление силового элемента.

Электрическое сопротивление силового элемента R определяется по формуле:

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (8)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала силового элемента;

A и L – рассчитанные соответственно площадь и длина силового элемента.

Определяется величина тока, проходящего через силовой элемент, с учетом закона Ома, по формуле:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (9)$$

где R – электрическое сопротивление силового элемента;

U – напряжение источника питания.

Поверочный расчет проводится после проектировочного и заключается в определении поля температур, поля деформаций, суммарного перемещения, параметров источника питания для нагрева путем непосредственного пропускания электрического тока в спроектированном силовом элементе с ЭПФ с использованием описанной ниже математической модели функционирования силового элемента из сплава с ЭПФ, изготавливаемого из проволоки.

В результате поверочного расчета получают уточненные характеристики силового элемента с ЭПФ (перемещение памяти формы, время срабатывания, мощность и напряжение источника питания) и при необходимости корректируют геометрические параметры силового элемента или условия его нагрева для достижения заданных параметров устройства.

В процессе создания силового привода для узла расчеховки математическая модель функционирования силового элемента с ЭПФ [7] адаптирована под реальную конструкцию силового привода.

При разработке адаптированной математической модели силовой элемент также рассматривался как термоциклированная струна из сплава с ЭПФ. Струна является нормально растянутой, и расчеховка обеспечивается рабочим ходом на сжатие при нагреве до температуры конца обратного мартенситного превращения джоулевым

теплом, выделяющемся при пропускании электрического тока непосредственно через струну.

Для определений перемещений силового элемента с ЭПФ, необходима аппроксимирующая зависимость деформации памяти формы (структурной деформации) от температуры.

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

$$h = \frac{1}{2} \int_0^L \beta[T(x,t)] dx, \quad (10)$$

где L – длина силового элемента;

x – относительная осевая координата;

$T(x,t)$ – значение текущей температуры, являющаяся функцией, зависящей от координаты по длине силового элемента и времени нагрева;

$\beta[T(x,t)]$ – величина структурной деформации, также являющаяся функцией, зависящей от координаты по длине силового элемента и времени нагрева.

Исходя из анализа формы экспериментальной зависимости, модельную зависимость структурной деформации фазового превращения от температуры аппроксимируем кусочно-линейным способом и принимаем в виде:

$$\beta(T) = \begin{cases} 0, & T < A_n \\ \beta_0 \frac{T - A_n}{A_k - A_n}, & A_n \leq T \leq A_k \\ \beta_0, & T > A_k \end{cases} \quad (11)$$

где β_0 – предельная величина структурной деформации;

T – текущая температура в точке силового элемента;

A_n – температура начала обратного мартенситного превращения;

A_k – температура конца обратного мартенситного превращения.

Соотношение (11) позволяет получить имитационную модель температурного поля силового элемента и отследить характеристики силового элемента из сплава с ЭПФ от варьирования входных параметров (l, A, U).

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 путём излучения, и, будучи ничтожным, в температурном диапазоне 20...200°C, 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, так как мартенситный переход сопровождается значительным поглощением тепла, что в литературе часто трактуется как «скачок теплоемкости» в температурном диапазоне фазового перехода [9]). Теплоемкость аустенитной и мартенситной фаз различается незначительно (не более чем на 10%) и в дальнейшем может быть принятой постоянной, усредненной.

Как говорилось выше, для расчета перемещений, напряжений и деформаций силового элемента, сформулированная краевая задача термоупругости (10)-(11) должна быть дополнена краевой задачей теплопроводности, состоящей из уравнения теплопроводности [10]:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = f(x,t), \quad (12)$$

и, граничных условий:

$$\text{для заделки при } x=0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_0 - T(x,t)); \quad (13)$$

для серединной точки (при $x = \frac{L}{2}$) исходя из

$$\text{условий симметрии } \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0. \quad (14)$$

При этом в начальный момент времени температура по сечению силового элемента постоянна и равна T_0

$$T(x,0) = T_0 = \text{const}. \quad (15)$$

Для выражений (12)-(15):

c – теплоемкость сплава ТН-1;

γ – плотность сплава ТН-1;

λ – коэффициент теплопроводности сплава ТН-1;

α – коэффициент теплообмена в концевой заделке;

Температурное поле $T(r,t)$, необходимое для расчета по соотношениям (10)-(11), определяется путем решения задачи теплопроводности (12)-(15). Дифференциальное уравнение (12), описы-

вающее процесс нагрева в данном силовом элементе, нелинейное и получение его аналитического решения связано с большими трудностями. Поэтому для решения поставленной задачи выбран путь численного моделирования процесса нагрева с применением конечно-разностного метода с неявной схемой дискретизации.

При численно-аналитическом моделировании, используем подстановку [10]:

$$G(T) = \int_{T_0}^T \frac{\lambda(\Theta)d\Theta}{\lambda(T_0)}, \quad (16)$$

При этом уравнение (12) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial G}{\partial t} - a(G) \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = f(x, t), \quad (17)$$

где $a(G) = \frac{\lambda(G)}{c(G)\rho}$.

Граничные условия (13) и (14) с учетом (15) можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\alpha}{\lambda}(G_0 - G) \text{ при } x=0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} = 0 \text{ при } x = \frac{l}{2}. \quad (19)$$

Исследуемый участок силового элемента разбивался сеткой на K узлов. Распределение теплофизических характеристик по сечению силового элемента в узлах конечно-разностной сетки аппроксимировалось в виде постоянной функции. Тогда уравнения (17), (18), (19) можно записать в виде системы из K линейных уравнений:

$$\frac{1}{\tau}(G_{m+1}^n - G_m^n) - \frac{a}{2h^2} G_m^n (G_{m+1}^n - G_{m-1}^n - 2(G_m^{n+1} + G_m^n) - (G_{m+1}^{n+1} + G_{m-1}^{n+1})) = f_m^n$$

для $0 < m < K$ (20)

$$G_0^n = G_1^n - \frac{\alpha}{\lambda(\tau)} \cdot \tau, \text{ для } m=0 \quad (21)$$

$$G_M^n = G_{M-1}^n, \text{ для } m=K, \quad (22)$$

где τ – шаг дискретизации по времени;

h – шаг дискретизации по координате x ;

f – удельная мощность источника питания, предварительно определённая с использованием соотношения (5).

По времени процесс нагрева силового элемента рассматривается за N шагов. На каждом текущем шаге n по экспериментальным данным определялось значение функции $\lambda = f_2(\tau)$, для каждого узла m вычисляется функция G_m^{n-1} . Так же вычисляется приведенное значение коэффициента температуропроводности a , для каждого узла

конечно-разностной сетки и решается система уравнений (20) – (22).

В результате решения данной системы уравнений вычислялись значения функции G_m^n , которые использовались как начальные для последующего шага задачи. В конце процесса нагрева определялись значения температуры для каждого узла сетки по зависимости $G = f_3(\tau)$, которые использованы для расчетов по соотношениям (10)-(11).

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

Данная программа предназначена для проведения поверочных расчетов разработанного силового элемента из сплава с ЭПФ выполненного из проволоки, работающего на растяжение-сжатие, предназначенного для работы в узле расчеховки КА.

Напряжение источника тока определяется необходимым временем срабатывания, что эквивалентно прогреву струны до температуры окончания обратного мартенситного превращения по всему объёму силового элемента или по части объема при установившемся тепловом режиме силового элемента.

Далее, по соотношению (5) уточняется необходимая мощность источника питания и при необходимости корректируется. Корректировка вносится в программу и расчет по соотношениям (20)-(22), повторяется вновь с последующим сравнением с результатами, полученными до корректировки.

Использование разработанной методики проектирования силового привода с ЭПФ на основе усовершенствованной модели позволило сократить время и материальные затраты на экспериментальные исследования при выборе рациональных схем термомеханического нагружения и проектирования силовых элементов с ЭПФ в виде струны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 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.
- 2 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.
- 3 А.с. СССР 1426844, МКИ³ В30В13/00, 15/34. Пресс для штамповки / Феоктистов В.С. Лизуников 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.

- 4 А.с. СССР 1530836, МКИ³ В30В13/00, 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; опубл. 23.12.89, Бюл. № 47. 3 с.
- 5 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.
- 6 Барвинок В. А. Разработка реверсивных силовых приводов из материалов с эффектом памяти формы для устройств, применяемых в узлах расчеховки космических аппаратов / *В.А. Барвинок, Богданович, Ломовской О.В., В.И. Вишняков М.А., Грошев А.А.* // Известия Самарского научного центра РАН. Т.13. №4(2). 2011. С. 301-306
- 7 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.
- 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 Сборка элементов трубопроводов с применением технологического оснащения с силовым приводом из сплава с эффектом памяти формы / *В.А. Барвинок, В.И. Богданович, Г.Е. Белашевский, Ю.А. Вашуков, О.В. Ломовской* // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. №3. С 16-19.
- 10 *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М: Высшая школа, 1967. 600 с.

DESIGN METHOD OF POWER DRIVES FROM MATERIAL SHAPE MEMORY EFFECT FOR ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

© 2013 V.A. Barvinok, V.I. Bogdanovich, A.A. Groshev, A.N. Plotnikov, O.V. Lomovsky

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov
(National Research University)

In this article the design of a power actuator alloy with shape memory effect, designed for operation in the popping your site, the technique of designing this drive based on a mathematical model developed by phenomenological.

Key words: spacecraft, popping your site, actuator shape memory, design methodology, 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

Alexander Groshev, Graduate Student at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department. Andrey Plotnikov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.

Oleg Lomovsky, Candidate of Technics, Associate Professor at the Aircraft Manufacturing and Quality Control in Engineering Department.