

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОВРЕМЕННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СИЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА БАЙПАСНОГО УСТРОЙСТВА ЛИАБ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭПФ

Бледнова Ж.М., Проценко Н.А., Мышевский И.С.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия
blednova@mail.ru, procenko_n@list.ru, myshevsky@mail.ru

Для обеспечения безотказной работы аккумуляторных батарей космических аппаратов, необходимо предусматривать устройства, парирующие отказ любого аккумулятора – байпасные устройства (БУ). Существующие в настоящее время БУ российского и зарубежного производства имеют существенный недостаток, заключающийся в невозможности проверки их работоспособности на стадии изготовления и приемо-сдаточных испытаний. Поэтому возникла необходимость создания БУ, обеспечивающего возможность многократной проверки работоспособности при обеспечении высокого уровня надежности и снижении массово-габаритных характеристик. Эта задача может быть решена за счет использования функциональных материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ).

Выполненное моделирование тепловых процессов в литий-ионной аккумуляторной батарее (ЛИАБ) в случае отказа одного из аккумуляторов позволило определить максимально допустимую температуру и время срабатывания БУ: $T_{\text{макс}} = 100^{\circ}\text{C}$, время срабатывания – 3с [1]. Предложено конструктивное решение БУ с термоприводом, силовой элемент которого изготовлен из сплава с ЭПФ в виде двойной концентрической пружины [2]. С учетом эксплуатационных условий ЛИАБ установлено, что для обеспечения безопасного режима работы материал силового элемента должен обеспечить следующие температуры фазовых превращений: $A_H = 80^{+10} \text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_K = 100^{+15} \text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_H = 65^{+15} \text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_K + 25^{+10} \text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве материала для силового элемента использовалась проволока из сплава ТН-1 (ТУ1822-03801538612-10), изготовленная ИФПМ СО РАН, г. Томск.

В настоящее время достаточно полно исследованы закономерности структурообразования в сплавах на основе TiNi при использовании ТМО и ПДО и их связь с функциональными свойствами. В то же время, при наведении ЭПФ непосредственно в технических устройствах выявляется ряд дополнительных конструктивных и технологических факторов, влияющих на функциональные характеристики.

Цель работы: исследование деформационно-силовых характеристик силового элемента термопривода БУ и разработка методики его термосилового подготовки на определенную величину деформации памяти формы.

Для управления параметрами предварительной обработки силового элемента термопривода БУ из сплава ТН1 и их оптимизации проведены металлографические, калориметрические и рентгеноструктурные исследования. Исследование функциональных свойств изделия (двойной концентрической пружины) определяли на специальном спроектированном и изготовленном устройстве (рис. 1,а). Наведение ЭПФ и ОЭПФ производится в специальном приспособлении (рис.1,б). С помощью этого устройства производилась навивка двухрядной пружины с шагом витков 10 мм. Такой шаг задан с целью обеспечения предварительной деформации пружины порядка 8–10%. Приспособление состоит из разрезного корпуса 1, стержня 2 для навивки внутреннего ряда пружины проволокой с ЭПФ 4, планок 3 с пазами под проволоку для фиксации шага наружного ряда пружины.

После навивки пружина вместе с приспособлением помещалась в вакуумную печь, где производилась термообработка при различной температуре и времени выдержки. Охлаждение производилось вместе с печью. Для оптимизации параметров термообработки с целью обеспечения необходимых температур мартенситных превращений и реактивного усилия, достаточного для совершения рабочего перемещения, производился нагрев пружины в широком интервале температур 300–800 °С и времени выдержки 10–90 минут.

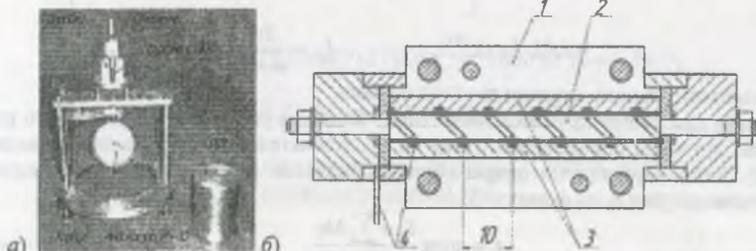


Рис. 1. Устройство для испытания пружин (а); приспособление для навивки пружин (б)

Исследования совместного влияния режимов ТМО и ПДО на параметры ЭФ показали, что максимальное реактивное усилие возникает в пружине после отжига при 560 °С в течение 30 минут, при этом обратимая деформация составляет 89%. Для решения технологической задачи установки пружины в БУ ее сжимали до соударения витков и выдерживали в течение 12 часов при температуре 120–130°С (термофиксация). В процессе термофиксации происходила релаксация напряжений и пружина принимала форму с рабочим перемещением витков 1–1,5 мм, что позволяет ее легко устанавливать в БУ. Исследования показали, что после термофиксации наблюдается изменение температуры M_s со 106 до 100°С при сохранении фазового состава и увеличение ЭФ на 3–4 % (достигает 92–93%), что согласуется с данными работы [3].

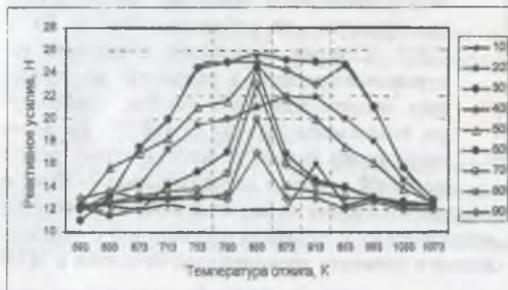


Рис. 2. Оптимизация параметров отжига силового элемента термопривода БУ ЛИАБ

Байпасные устройства для типажного ряда ЛИА к КА «Гло-насс-К» имеют единый конструктивно-технологический принцип и отличаются усилием срабатывания исполнительного механизма БУ. Для оценки величины необходимого реактивного усилия силового элемента термопривода БУ типажного ряда ЛИАБ выполнен инженерный расчет методом последовательных догадываний с использованием термомеханической диаграммы сплава ТН1 [4]. Отличительная особенность расчета заключается в том, что выполнен

он для двойной концентрической пружины из единой проволоки одного диаметра при условии параллельной работы. Задача определения реактивных усилий в пружине рассматривалась как статически неопределимая с распределением усилий пропорционально жесткостям пружин. Исходными данными для расчета являются длина пружины L_0 ; радиус проволоки r_0 ; радиус навивки наружной и внутренней пружин R_1 и R_2 ; число витков n ; параметры аппроксимации термомеханической диаграммы E и t для сплава ТН1 $m=1/3$, $E=1800$ МПа. Полное перемещение силового элемента (пружины) λ определяется как сумма перемещений от изгибающего λ_1 и крутящего λ_2 моментов, определяемых на основ тео-

ремы Кастильяно. Интегрируя по всей длине пружины $2\pi nR$ и складывая перемещения от изгиба и кручения, получаем λ

$$\Delta\lambda = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot \Delta P^m \frac{1}{R} \frac{2m+1}{m} \left[\left[\frac{(\cos\alpha)^{2m+2}}{GI_{kr}} \right]^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{2} \left[\frac{(\sin 2\alpha)^{m+1}}{2EI_x} \right]^{\frac{1}{m}} \right] \quad (1)$$

$$I_x = 1,02 \cdot (r_0 \cdot 2)^{m+3}, \quad I_{kr} = \frac{2\pi}{m+3} (r_0 \cdot 2)^{m+3} \quad (2)$$

I_x, I_{kr} — условные моменты инерции двойной пружин.

Так как при работе пружины значительно меняется угол подъема витка α , то полное удлинение пружины определяется путем её последовательных догрузок на величину силы ΔP_i . Затем определяется приращение перемещения Δh_i и на каждом последующем шаге уточняется угол α ; по формуле 3:

$$\alpha = \arctg \frac{L_0 + \sum \Delta h_i}{2 \pi \cdot n \cdot R} \quad (3)$$

Суммируя перемещения на каждом шаге, получаем полное удлинение пружины. Процесс продолжается до достижения пружиной требуемой длины, однако при этом должно выполняться необходимое условие прочности $\sigma_{max} \leq [\sigma]$. Результаты расчета реактивных усилий, возникающих при срабатывании силовых элементов в форме концентрических пружин, для трех типов БУ приведены рис.3. Расчет выполнен для двойных концентрических пружин из проволоки сплава ТН1 диаметром 0,8, 1,0 и 1,2 мм, с семью витками каждая, диаметрами навивки 8, 10 и 12 мм соответственно.

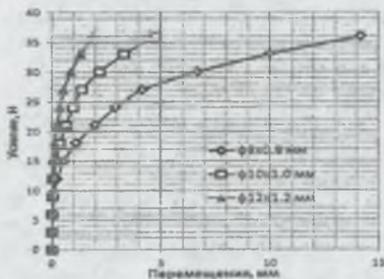


Рис. 3. Реактивные усилия, возникающие при срабатывании силового элемента термопривода БУ для типажного ряда ЛИАБ к космическому аппарату «Глонасс-К»

и вибрации в диапазоне 20–2000 Гц). Результаты стендовых испытаний показали устойчивость БУ ко всем видам электрических, механических и тепловых воздействий и подтвердили функциональные характеристики силового элемента термопривода из сплава с ЭПФ [5].

Выводы. В результате проведенных исследований изучены деформационно-силовые характеристики силового элемента термопривода БУ из сплава ТН1 и разработана методика его термосиловой подготовки, при которой силовой элемент генерирует усилия, достаточные для срабатывания БУ. Это позволило разработать малогабаритные БУ ЛИАБ к КА «Глонасс-К» с возможностью многократной проверки срабатывания при приемодостаточных испытаниях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 1.2.1 / 6803, 1.2.1 / 9426).

1. Бледнова Ж.М., Лапшин В.Ю., Проценко Н.А. // Тр. Академэнерго, 2011. № 2. – С 117-127.
2. Бледнова Ж.М., Галкин В.В., Проценко Н.А. // Полет, 2011. № 6. С. 58-60.
3. Реснина Н.Н., Беляев С.П., Сибирев А.В. // ЖТФ, 2011. Т. 81. С. 144-147
4. Крахин О.И, Кузнецов А.П., Косов М.Г.. Сплавы с памятью. Основы проектирования конструкций. Старый Оскол. «ТНТ», 2011, 396 с.
5. Галкин В.В., Бледнова Ж.М., Проценко Н.А. // Полет 2012. № 5. - С. 20-27.

УПРОЧНЯЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ti-Al-Si-N

Волочко А.Т., Марков Г.В., Мисуню П. Н.

*Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
misunopavel@gmail.com*

Введение

В настоящее время активно разрабатываются и исследуются новые методы модификации поверхностного слоя различными материалами с целью придания им требуемых свойств. Наиболее распространенным среди них является осаждение упрочняющих покрытий вакуумно-дуговым методом [1].

Получение современных упрочняющих наноконкомпозитных покрытий вакуумно-дуговым методом требует осаждения на подложку многокомпонентных потоков плазмы. Эти потоки могут быть получены одновременным испарением отдельных однокомпонентных катодов или одного многокомпонентного катода, содержащего компоненты наносимого покрытия. При использовании отдельных катодов необходимый элементный состав потока достигается сложным и трудоемким подбором технологических режимов испарения каждого из катодов, состава и давления реакционного газа.

В этой связи интерес представляют исследования, в которых наноконкомпозитные покрытия получают на промышленных установках при испарении одного многокомпонентного катода [2].

Целью данной работы было исследование свойства покрытий, полученных при помощи многокомпонентного катода, изготовленного методом литья в вакуумной печи в среде аргона при температуре 1500 °С.

Материалы и методики

Были проведены исследования образцов молибденовой фольги и силуминовых сплавов АК12М2МгН (эвтектический) и АК20 (заэвтектический), с покрытиями, осажденными из трехкомпонентного катода Ti-Al-Si. Осаждение покрытий производилось вакуумно-дуговым методом. Режимы обработки образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обработки образцов

Номер образца	Катод	Подложка	Давление азота, Па	Ток дуги катода, А	Напряжени- е смеще- ния, В	Время осажде- ния, мин	Темпе- ратура, °С
1	63Ti-32Al - 5Si	AK12M2M гН	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100	3,5	300
2		AK20	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100		
3		Mo-фольга	$1 \cdot 10^{-1}$	80	100		