

УДК 531.2:669.018.2

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОВОЛОЧНОГО ЭПФ-ПРИВОДА ТРАНСФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© В.Г. Быков, А.И. Разов, М.М. Френкель

Россия, Санкт-Петербург, Институт математики и механики СПбГУ

Bykov V.G., Razov A.I., Frenkel M.M. Statical calculation of SMA-actuator for transformable constructions. The model of SMA-actuator for transformable space constructions was considered. Actuator had two toggles with hinge and SMA-wire working element. The process of unfolding hinged truss was calculated in quasi-static statement. On this base the parameters of SMA-wire working element were calculated.

Уникальные функциональные свойства материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) предоставляют широкие возможности при конструировании принципиально новых, революционных устройств, среди которых целый класс образуют приводы различного типа и, пожалуй, наиболее яркими представителями могут служить приводы космического назначения. Данная работа посвящена расчету привода рычажного механизма, предназначенного для трансформирования в открытом космосе ячейки шарнирной стержневой конструкции параллелограмного типа. Рабочим элементом привода служит проволока из материала с ЭПФ. В таких устройствах бесспорным лидером является никелид титана благодаря необходимому сочетанию функционально-механических свойств, обеспечивающих высокую надежность привода. Оптимальным способом нагрева рабочего элемента является прямое пропускание электрического тока от бортовых источников питания [1]. Проектирование рабочего элемента, в основном, базируется на величине возвращаемой деформации, которую требует изменение конфигурации механизма при раскрытии и величине силы натяжения проволоочного привода, необходимой для трансформирования космического объекта.

Рассмотрим плоскую модель ячейки, состоящую из шарнирного четырехзвенника $ABCD$ и рычажного привода BED (рис. 1).

Длины звеньев таковы, что шарниры A, B, C и D являются вершинами параллелограмма. Рычажный механизм представляет собой два шарнирно соединенных звена и прикрепленного к ним проволоочного ЭПФ-привода (рис. 2). Раскрытие ячейки происходит за счет сил натяжения привода, возникающих вследствие нагрева проволоки электрическим током. Данная конструкция имеет одну степень свободы; в качестве обобщенной координаты выберем угол φ , который образуют между собой звенья рычажного механизма DE и BE . Введем обозначения: φ_1 - угол между звеньями AD и FB , φ_2 - угол между звеньями FB и BE , φ_3 - угол между звеньями DE и DG , χ - угол ABF .

Найдем силу натяжения привода в зависимости от угла φ в квазистатической постановке, то есть будем считать, что в каждый фиксированный момент времени

ячейка находится в состоянии статического равновесия. Тогда, согласно принципу виртуальных перемещений, сумма работ активных сил на виртуальных перемещениях равна нулю.

Активными силами, действующими на звенья ячейки, являются сила натяжения привода и силы сопротивления в шарнирах. Чтобы найти виртуальную работу силы натяжения, рассмотрим более подробно конструкцию рычажного механизма (рис. 2). Проволока огибает шарнир E по направляющей дуге с радиусом d , поэтому на каждое звено действует пара сил с моментом $F_n d$, где F_n - сила натяжения привода. Отсюда виртуальная работа силы натяжения будет равна

$$\delta A_n = F_n d \delta \varphi. \quad (1)$$

Силы сопротивления, действующие в шарнирах A, B, C, D , будем считать одинаковыми и соответст-

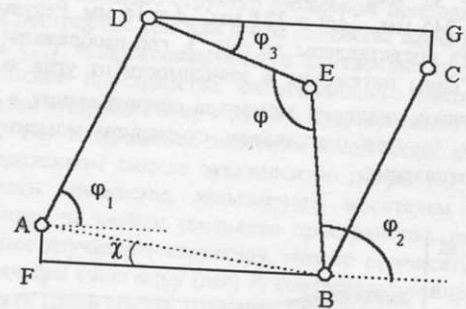


Рис. 1. Плоская модель ячейки.

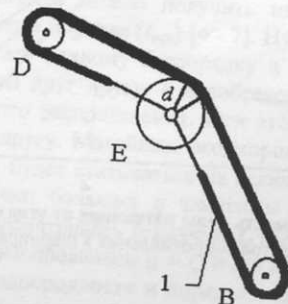


Рис. 2. Рычажный механизм.

вующие им моменты обозначим через M_1 . Моменты сил сопротивления в шарнирах B и D рычажного механизма обозначим через M_2 , а в шарнире E - через M_3 . Тогда виртуальная работа сил сопротивления будет равна

$$\delta A_{\text{сопр}} = 4M_1\delta\varphi_1 + M_2(\delta\varphi_2 + \delta\varphi_3) + M_3\delta\varphi. \quad (2)$$

Из геометрических соображений имеем

$$\varphi_2 + \varphi_3 = \varphi,$$

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{|DE||BE|(1 + \cos\varphi) - |AD||AF|}{|AD||AB|}\right) - \chi,$$

отсюда следует

$$\delta\varphi_2 + \delta\varphi_3 = \delta\varphi$$

$$\delta\varphi_1 = \frac{|DE||BE|\sin\varphi}{\sqrt{|AD|^2|AB|^2 - [|DE||BE|(1 + \cos\varphi) - |AD||AF|]^2}} \delta\varphi. \quad (3)$$

Подставляя формулы (3) в выражение (2) и приравнявая виртуальные работы сил сопротивления (2) и натяжения (1), найдем силу натяжения в зависимости от угла φ

$$F_n = \frac{1}{d} \left(\frac{4M_1|DE||BE|\sin\varphi}{\sqrt{|AD|^2|AB|^2 - [|DE||BE|(1 + \cos\varphi) - |AD||AF|]^2}} + M_2 + M_3 \right). \quad (4)$$

Проведем расчет силы натяжения при следующих размерах звеньев ячейки: $|AD| = 850$ мм, $|AF| = 32$ мм, $|FB| = 380$ мм, $|BE| = 715$ мм, $|DE| = 245$ мм, $|AB| = 381$ мм, $d = 16$ мм. Результаты расчета представлены на рис. 3, где изображены графики силы натяжения в зависимости от угла φ для различных значений моментов сопротивления в шарнирах, но при одинаковом суммарном моменте сил сопротивления.

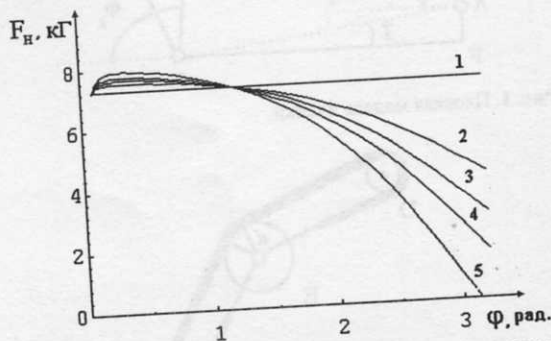


Рис. 3. Зависимость силы натяжения от угла φ для различных значений моментов сопротивления в шарнирах.

Кривая 3 соответствует случаю $M_1 = M_2 = M_3 = = 0,05$ кГм; кривая 2 - $M_1 = 0,035$ кГм; $M_2 = M_3 = = 2 M_1$; кривая 4 - $M_1 = 0,064$ кГм, $M_2 = M_3 = 0,5 M_1$. Предельному случаю $M_1 = 0$ соответствует прямая 1, а предельному случаю $M_2 = M_3 = 0$ - кривая 5. Интересно отметить, что кривые 1 - 5 имеют две инвариантные точки, одна соответствует начальному состоянию ячейки, другая - углу раскрытия, приблизительно 60° .

Из рисунка видно, что при малых углах раскрытия ячейки ($\varphi < 60^\circ$) усилие в приводе тем больше, чем больше моменты сопротивления в шарнирах параллелограмма $ABCD$, а при больших углах раскрытия сила натяжения растет с ростом сопротивления в шарнирах рычажного механизма.

Теперь, получив значения силы натяжения F_n , можно рассчитать длину проволочного привода. Привод, как уже было сказано выше, должен обладать способностью сократиться при нагреве. Во-первых, это сокращение должно компенсировать уменьшение (L_1) расстояния между точками крепления концов привода на корпусе при раскрытии ячейки, которое в данной конструкции с хорошим приближением равно πd . Во-вторых, оно должно обеспечить найденное усилие F_n (с некоторым, например 1,5-кратным, запасом прочности) во время генерации реактивных напряжений при реализации ЭПФ в стесненных условиях, создаваемых сопротивлением раскрытию ячейки. Кроме того, следует учесть температурное удлинение проволоки при нагреве на $150-200$ градусов, которое при начальной длине L_0 равно $L_0 \cdot 10^{-3}$. Обычно привод для оптимизации функционально-механических характеристик предварительно термоциклируют под повышенным напряжением, что в дальнейшем позволяет использовать упругий закон деформирования при меньших напряжениях. Предварительная остаточная деформация в мартенситном состоянии не должна превышать 5%, что диктуется свойствами используемого полуфабриката и должна быть изменена при использовании другого материала. Исходя из вышесказанного, получим уравнение для нахождения начальной длины L_0 привода перед заданием ему деформации, необходимой для того, чтобы при нагреве совершить раскрытие ячейки:

$$0,05 L_0 = L_1 + L_0 F_n / (S E_A) + 10^{-3} L_0,$$

где S - площадь поперечного сечения проволоки из никелида титана, E_A - модуль упругости аустенита.

Таким образом, в случае медленного (квазистатического) трансформирования ячейки стержневой шарнирной конструкции расчет привода разделяется на две самостоятельные задачи: статический расчет сил натяжения привода при раскрытии ячейки и расчет длины привода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко Ю.Д., Лихачев В.А., Разов А.И., Трусов С.Н., Чернявский А.Г. Опыт применения сплавов с эффектом памяти формы при сооружении крупногабаритных конструкций в открытом космосе // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 11. С. 153-161.