

## Расчет исполнительного элемента предохранительного механизма безопасной электрической розетки, выполненного из сплава с эффектом памяти формы

© С.М. Ганыш

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

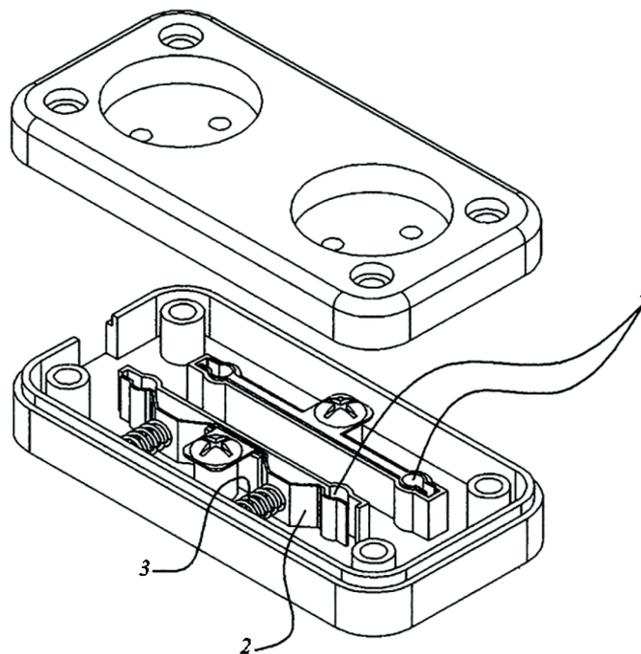
*Рассмотрена возможность создания предохранительного элемента безопасной электрической розетки на основе эффекта памяти формы. Разработана математическая модель винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы. Для описания поведения материала применяется феноменологический подход, основанный на диаграмме фазовых переходов. Эффект памяти учтен с помощью дополнительного внутреннего силового фактора — момента памяти формы при кручении. Представлен алгоритм построения зависимости момента памяти формы для изотермического нагружения от крутящего момента в сечении. Решена задача о совместном деформировании пружины из сплава с эффектом памяти формы и плоской медной пружины при нагреве. Контактная пластина заменена эквивалентной пружинной, жесткость которой получена с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих плоский изгиб стержня.*

**Ключевые слова:** сплав с эффектом памяти формы, винтовая цилиндрическая пружина, безопасная розетка

**Введение.** Материалы с памятью формы относятся к классу интеллектуальных материалов, которые применяются в различных областях науки и техники [1, 2]: авиационно-космическая отрасль, медицина, приборостроение. Такие свойства, как чувствительность, переключаемость, энергоемкость, позволяют использовать упругие элементы из сплава с эффектом памяти формы в качестве исполнительных элементов термодатчиков, терморегуляторов, предохранителей. Среди конструкций упругих элементов наиболее широкое распространение получили нити, плоские и винтовые цилиндрические пружины, расчет которых проводят с помощью стержневых моделей.

На рис. 1 представлена безопасная электрическая розетка с предохранителем, представляющим собой винтовую цилиндрическую пружину из сплава с эффектом памяти формы [3]. В случае перегрева подвижная контактная пластина 2 и пружина из сплава с эффектом памяти формы 3 нагреваются, вызывая в пружине фазовый переход ориентированного мартенсита в аустенит. В результате пружина сокращается и размыкает контакт 1.

Цель работы — разработка алгоритма для расчета безопасной электрической розетки с исполнительным элементом в форме винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы, а также его численная реализация.



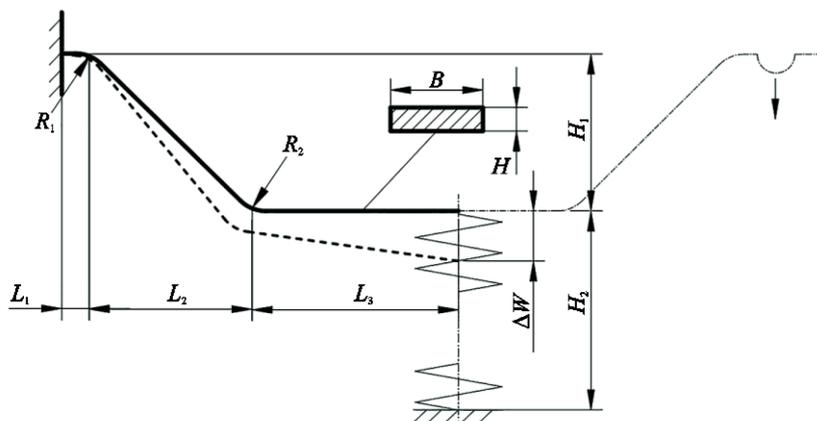
**Рис. 1.** Безопасная электрическая розетка:

1 — контакты; 2 — подвижная контактная пластина; 3 — пружина из сплава с эффектом памяти формы

**Расчетная схема предохранительного механизма.** На рис. 2 представлена расчетная схема предохранительного механизма с указанием характерных размеров:

$$L_1 = 0,4 \text{ мм}; L_2 = 4,7 \text{ мм}; L_3 = 5,4 \text{ мм}; R_1 = R_2 = 0,6 \text{ мм};$$

$$H_1 = 2,9 \text{ мм}; H_2 = 13,7 \text{ мм}; B = 10 \text{ мм}; H = 0,1 \text{ мм}.$$



**Рис. 2.** Расчетная схема предохранителя

**Математическая модель винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы.** При расчете винтовой цилиндрической пружины растяжения-сжатия будем полагать, что за фазовый переход отвечает крутящий момент в сечениях витка, а влияние изгибающего момента пренебрежимо мало. В качестве модели материала из сплава с эффектом памяти формы выбрана феноменологическая одномерная модель, основанная на диаграмме фазовых переходов [4]. Для мартенситной неупругости соотношение, определяющее объемную долю ориентированного мартенсита, может быть записано в виде

$$\xi_S = F_{\sigma}(\tau, \tau_S, \tau_F), \quad (1)$$

где  $\xi_S$  — объемная доля ориентированного мартенсита;  $\tau$  — касательные напряжения;  $\tau_S, \tau_F$  — постоянные параметры диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы.

В качестве функции  $F_{\sigma}$  могут быть выбраны линейная тригонометрическая и экспоненциальная функции

$$\xi_S = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau \leq \tau_S; \\ \frac{\tau - \tau_S}{\tau_F - \tau_S}, & \text{если } \tau_S < \tau < \tau_F; \\ 1, & \text{если } \tau \geq \tau_S; \end{cases} \quad (2)$$

$$\xi_S = \begin{cases} 0, & \text{если } \tau \leq \tau_S; \\ \frac{1}{2} \cos\left(\pi \frac{\tau - \tau_F}{\tau_S - \tau_F}\right) + \frac{1}{2}, & \text{если } \tau_S < \tau < \tau_F; \\ 1, & \text{если } \tau \geq \tau_S, \end{cases} \quad (3)$$

а также массив экспериментальных точек, без аппроксимации аналитическими функциями [5].

Для обратного мартенситного превращения соотношение, определяющее объемную долю ориентированного мартенсита, может быть записано так:

$$\xi_S = F_T(\tau, A_S A_F, C_{SA}, \xi_S^0), \quad (4)$$

где  $\xi_S$  — объемная доля ориентированного мартенсита;  $\tau$  — касательные напряжения;  $T$  — температура;  $A_S, A_F, C_{SA}$  — постоянные параметры диаграммы фазовых переходов сплава с эффектом памяти формы [6];  $\xi_S^0$  — объемная доля ориентированного мартенсита до начала фазового перехода.

Тригонометрическая аппроксимация для функции  $F_T$  имеет вид

$$\xi_S = \begin{cases} \xi_S^0, & \text{если } T \leq A_S + \frac{\tau}{C_{SA}}; \\ \frac{\xi_S^0}{2} \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{A_F - A_S} \left( T - A_S - \frac{\tau}{C_{SA}} \right) \right] + 1 \right\}, & \text{если } A_S + \frac{\tau}{C_{SA}} < T < A_F + \frac{\tau}{C_{SA}}; \\ 0, & \text{если } T \geq A_F + \frac{\tau}{C_{SA}}. \end{cases} \quad (5)$$

Для сдвиговых деформаций предполагается справедливым аддитивное разложение на упругую ( $\gamma_{\text{упр}}$ ) и неупругую ( $\gamma_L \xi_S$ ) составляющие:

$$\gamma = \gamma_{\text{упр}} + \gamma_L \xi_S, \quad (6)$$

где  $\gamma_L$  — максимальная сдвиговая деформация, возникающая в результате полной ориентации мартенсита.

Для учета эффекта памяти формы при кручении вводится дополнительный момент памяти формы кручения [7]:

$$M_{\text{кр}}^{SMA} = 2\pi G \gamma_L \int_0^{d/2} \xi_S(r) r^2 dr; \quad (7)$$

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{16}{\pi G d^3} (M_{\text{кр}} + M_{\text{кр}}^{SMA}) = \frac{M_{\text{кр}} + M_{\text{кр}}^{SMA}}{G W_{\text{кр}}}. \quad (8)$$

Соотношения (7), (8) справедливы для стержня круглого поперечного сечения и получены в предположении о справедливости гипотезы о неискривляемости радиуса:

$$\gamma(r) = \gamma_{\text{max}} \frac{2r}{d}. \quad (9)$$

Для построения упругой характеристики винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы применяются классические уравнения [8], модифицированные с помощью момента памяти формы:

$$\begin{cases} EJ_{\text{изг}} \left( \frac{2 \cos^2 \alpha}{D} - \frac{2 \cos^2 \alpha_0}{D_0} \right) = -\frac{FD \sin \alpha}{2}; \\ GJ_{\text{кр}} \left( \frac{\sin 2\alpha}{D} - \frac{\sin 2\alpha_0}{D_0} \right) = \frac{FD \cos \alpha}{2} + M_{\text{кр}}^{SMA}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda = l(\sin \alpha - \sin \alpha_0), \quad (11)$$

где  $EJ_{\text{изг}}$ ,  $GJ_{\text{кр}}$  — жесткость витка на изгиб и кручение соответственно;  $D_0$ ,  $\alpha_0$  — начальные средний диаметр и угол подъема винтовой линии;  $D$ ,  $\alpha$  — текущие средний диаметр и угол подъема винтовой линии;  $l$  — длина винтовой линии.

Построение зависимости момента памяти формы от крутящего момента при постоянной температуре выполняем в такой последовательности:

1) задаем некоторые значения сдвиговой деформации на максимальном радиусе сечения  $\gamma_{\text{max}}$ ;

2) разбиваем сечение на некоторое количество слоев, в каждом из которых определяем значение сдвиговой деформации с помощью соотношения (9);

3) с помощью соотношения (1) рассчитываем в каждом из слоев объемную долю ориентированного мартенсита  $\xi_S$ ;

4) с помощью соотношения (7) вычисляем момент памяти формы кручения  $M_{\text{кр}}^{SMA}$ ;

5) из соотношения (8) определяем крутящий момент  $M_{\text{кр}}$ , соответствующий полученному моменту памяти формы  $M_{\text{кр}}^{SMA}$ .

Задаваясь различными значениями максимальных деформаций на внешнем радиусе, можно построить зависимость, представленную на рис. 3.

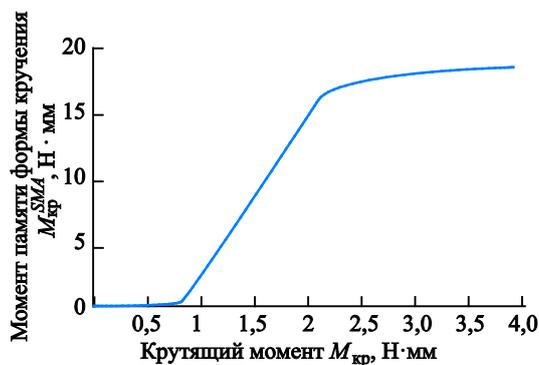


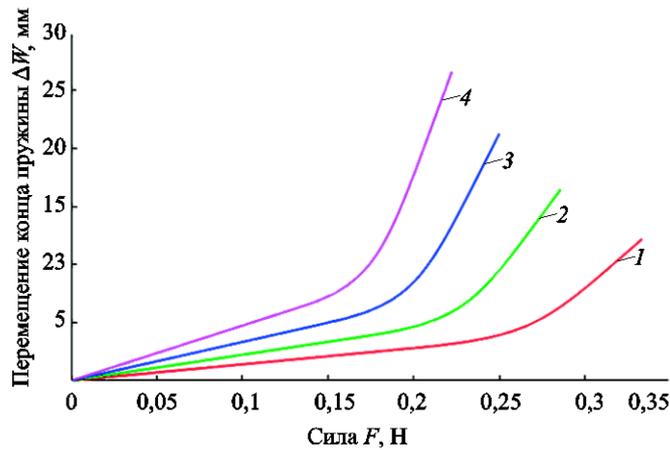
Рис. 3. Зависимость момента памяти формы кручения от крутящего момента

Зависимость построена при следующих параметрах материалов и размерах поперечного сечения:

$$E_M = 20\,000 \text{ МПа}; \mu_M = 0,32; \tau_S = 14,5 \text{ МПа};$$

$$\tau_f = 45 \text{ МПа}; \gamma_L = 0,05; d = 0,6 \text{ мм}.$$

На рис. 4 представлено семейство упругих характеристик винтовой цилиндрической пружины растяжения-сжатия, полученное для пружины следующих геометрических размеров:  $d = 0,6 \text{ мм}$ ,  $i_p = 8$ ;  $H_0 = 10 \text{ мм}$ .



**Рис. 4.** Семейство упругих характеристик пружины:  
1 —  $D_0 = 6 \text{ мм}$ ; 2 —  $D_0 = 7 \text{ мм}$ ; 3 —  $D_0 = 8 \text{ мм}$ ; 4 —  $D_0 = 9 \text{ мм}$

**Математическая модель контактной пластины.** Контактная пластина моделируется с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих плоский изгиб стержня [9]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{ds_0} = (1 + \varepsilon_0) \cos \vartheta; \\ \frac{dy}{ds_0} = (1 + \varepsilon_0) \sin \vartheta; \\ \frac{d\vartheta}{ds_0} = \frac{d\vartheta_0}{ds_0} + (1 + \varepsilon_0) \frac{M}{B_{\text{изг}}}; \\ \frac{dU}{ds_0} = -q_x(1 + \varepsilon_0); \\ \frac{dV}{ds_0} = -q_y(1 + \varepsilon_0); \\ \frac{dM}{ds_0} = -(m + V \cos \vartheta - U \sin \vartheta)(1 + \varepsilon_0), \end{array} \right. \quad (12)$$

где  $x, y$  — координаты осевой линии в глобальной системе координат;  $\vartheta$  — угол поворота сечения;  $U, V, M$  — силы и изгибающий момент, записанные в глобальной системе координат;  $d\vartheta_0/ds_0$  — начальная кривизна стержня;  $\epsilon_0$  — деформация оси стержня, определяемая соотношением

$$\epsilon_0 = \frac{U \cos \vartheta + V \sin \vartheta}{EA}. \quad (13)$$

Геометрия контактной пластины задается приближенно в виде набора прямолинейных и дуговых участков и учитывается в системе дифференциальных уравнений с помощью функции начальной кривизны:

$$\frac{dv_0}{ds_0} = \begin{cases} 0, & \text{если } s \in [0, s_1]; \\ -\frac{1}{R_1}, & \text{если } s \in [s_1, s_2]; \\ 0, & \text{если } s \in [s_2, s_3]; \\ \frac{1}{R_2}, & \text{если } s \in [s_3, s_4]; \\ 0, & \text{если } s \in [s_4, s_5]. \end{cases} \quad (14)$$

На рис. 5 представлена изогнутая ось медной контактной пластины в недеформированном и деформированном состояниях, на рис. 6 — упругая характеристика контактной пластины.

Рис. 5. Осевая линия контактной пластины:  
1 — недеформированная ось; 2 — деформированная ось

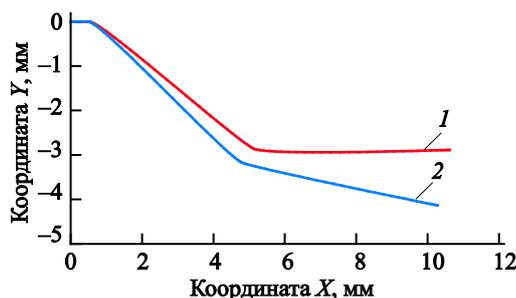
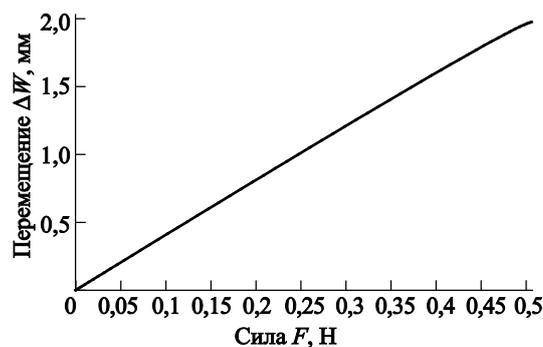


Рис. 6. Упругая характеристика контактной пластины



Упругая характеристика также может быть получена с помощью конечно-элементного подхода в существующих программных конечно-элементных комплексах. На рис. 7 представлена конечно-элементная модель контактной пластины в недеформированном и деформированном состояниях, построенная с помощью программного комплекса ANSYS.

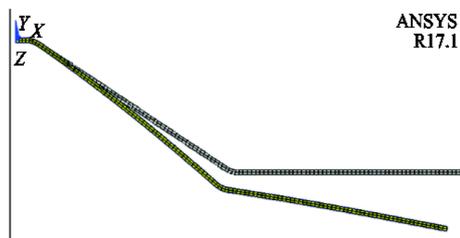


Рис. 7. Конечно-элементная модель контактной пластины

**Расчет предохранительного механизма безопасной электрической розетки.** Пружина перед использованием предварительно нагружается, а затем разгружается таким образом, чтобы после разгрузки остаточное удлинение пружины  $W_{\text{ост}}^{\text{max}}$  удовлетворяло условию

$$W_{\text{ост}}^{\text{max}} + H_0 = H_2. \quad (15)$$

На первом этапе расчета выбираются параметры винтовой цилиндрической пружины, строится зависимость момента памяти формы от крутящего момента, а затем с помощью соотношений (10), (11) — зависимость остаточного удлинения от приложенной нагрузки и определяется сила, при которой остаточное удлинение удовлетворяет соотношению (15).

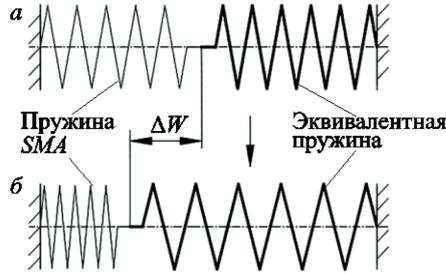
На втором этапе, когда пружина соединяется с контактной пластиной, рассматривается совместный нагрев. Для расчета совместной конструкции контактная пластина заменяется эквивалентной пружиной, матрица жесткости определяется соотношением

$$[K(W)]_{\text{cont}} = K_{\text{cont}}(W) \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где  $K_{\text{cont}}(W)$  — текущее значение жесткости контакта, получаемое с помощью упругой характеристики контактной пластины.

Расчетная схема модели с эквивалентной пружиной представлена на рис. 8.

**Рис. 8.** Расчетная схема модели с эквивалентной пружиной:  
*a* — до нагрева; *б* — после нагрева



При нагреве ориентированный мартенсит переходит в аустенит и происходит взаимное перемещение концов пружин  $\Delta W$ . Для определения величины взаимного смещения в зависимости от температуры нагрева используется следующее нелинейное соотношение:

$$\Delta W = \left[ W_{\text{ост}}^{\text{max}} - W_{\text{ост}} \left( M_{\text{кр}}^{\text{SMA}}(T) \right) \right] \frac{K_{\text{SMA}}(\Delta W, T)}{K_{\text{SMA}}(\Delta W, T) + K_{\text{cont}}(\Delta W)}, \quad (17)$$

где  $W_{\text{ост}}^{\text{max}}$  — предварительное остаточное удлинение пружины из сплава с эффектом памяти формы до начала нагрева;  $W_{\text{ост}} \left( M_{\text{кр}}^{\text{SMA}}(T) \right)$  — текущее удлинение пружины, связанное с ориентацией мартенсита;  $K_{\text{SMA}}$  — жесткость пружины.

Жесткость пружины из сплава с эффектом памяти формы является переменной и определяется соотношением

$$K_{\text{SMA}}(\Delta W, T) = G(\Delta W, T) \frac{4J_{\text{кр}}}{l [D(\Delta W, T)]^2 \cos[\alpha(\Delta W, T)]}. \quad (18)$$

Текущий модуль упругости  $G(\Delta W, T)$  зависит от соотношения мартенсита и аустенита в сечении и вычисляется по формуле

$$G(T) = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{1}{G_M} \cdot [\xi_M(r_i, T) + \xi_S(r_i, T)] + \frac{1}{G_A} [1 - \xi_M(r_i, T) - \xi_S(r_i, T)] \right)^{-1} \frac{A_i}{A_\Sigma} \right], \quad (19)$$

где  $G_M$ ,  $G_A$  — модули упругости для мартенситной и аустенитной фаз соответственно;  $\xi_S(r_i, T)$ ,  $\xi_M(r_i, T)$  — объемные доли ориентированного и неориентированного мартенсита в сечениях стержня;  $A_i$  — площадь поперечного сечения  $i$ -го слоя;  $A_\Sigma$  — площадь всего поперечного сечения.

Следует отметить, что при определении текущего момента памяти формы кручения  $M_{кр}^{SMA}(T)$  и текущего модуля упругости второго рода  $G(\Delta W, T)$  на каждом температурном шаге используются соотношения (6)–(9).

Для предварительного расчета оценку перемещения можно проводить по следующему соотношению:

$$\Delta W_{\max} \approx W_{\text{ост}}^{\max} \frac{\frac{G_A d^4}{8D_0^3 i_p}}{\frac{G_A d^4}{8D_0^3 i_p} + \frac{K_{\text{cont}}(0) + K_{\text{cont}}(W_{\text{ост}}^{\max})}{2}}. \quad (20)$$

**Результаты расчета.** На рис. 9 представлена зависимость остаточного удлинения пружины от приложенной силы, полученная с помощью соотношений (10), (11) при следующих параметрах пружины:

$$D_0 = 6 \text{ мм}; \quad H_0 = 10,5 \text{ мм}.$$

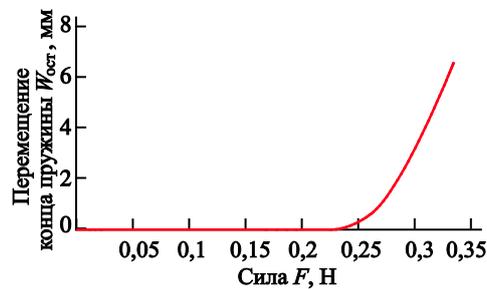


Рис. 9. Остаточное удлинение пружины

Для выбранных параметров пружины предварительная сила растяжения составляет 0,297 Н.

С помощью конечно-разностных соотношений упругая характеристика контактной пластины пересчитывается в зависимость жесткости контактной пластины от перемещения, представленную на рис. 10.

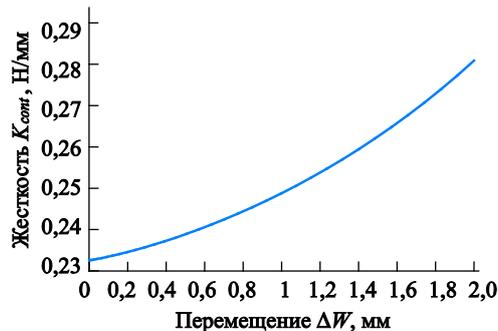


Рис. 10. Зависимость жесткости контакта от перемещения

Зависимость жесткости контакта от перемещения интерполировалась кусочно-линейной функцией, в результате была получена зависимость  $K_{cont}(\Delta W)$ .

Для совместного деформирования контактной пластины и винтовой цилиндрической пружины при нагреве были получены зависимости для момента памяти формы при кручении (рис. 11) и взаимного перемещения пружин (рис. 12) от температуры при нагреве при следующих параметрах материала:

$$A_S = 68 \text{ }^\circ\text{C}; A_f = 73,8 \text{ }^\circ\text{C}; E_M = 20 \text{ 000 МПа};$$

$$E_A = 31 \text{ 000 МПа}; \mu_A = \mu_M = 0,32;$$

$$C_{SA} = 6,73 \text{ МПа / }^\circ\text{C},$$

где  $A_S, A_f$  — характерные температуры фазовых переходов;  $E_M, E_A$  — модули упругости мартенсита и аустенита;  $\mu_A, \mu_M$  — коэффициенты Пуассона.

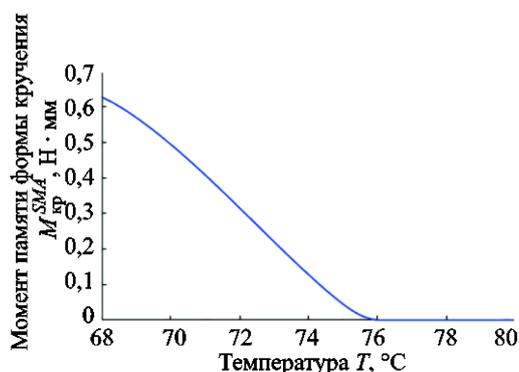


Рис. 11. Зависимость момента памяти формы от температуры

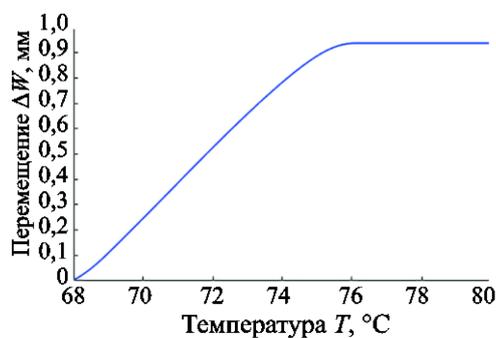


Рис. 12. Зависимость перемещения конца пружины от температуры

Отметим, что вопрос выбора материала с памятью формы, связанный с температурами начала и конца обратных мартенситных превращений, требует отдельного исследования и в рамках работы не рассматривается.

Зависимость, представленная на рис. 12, показывает значение перемещения, которое происходит между вилкой и контактной пластиной при срабатывании предохранительного механизма. Перемещения  $\Delta W$ , равного 0,93 мм, достаточно для корректной работы предохранительного механизма (см. рис. 12).

Справедливость полученных результатов была подтверждена сравнением теоретических и экспериментальными данными, представленными в литературе [3, 10, 11].

**Заключение.** Разработана математическая модель исполнительного элемента безопасной электрической розетки в форме винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы. Предложена методика учета эффекта памяти формы в существующих уравнениях механики стержней с помощью дополнительных внутренних силовых факторов. Решены задача об изотермическом нагружении винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы в зоне стабильности мартенсита, а также задача о совместном деформировании пружины и контактной пластины при нагреве. Получены результаты расчета предохранительного механизма с выбранными геометрическими параметрами, согласующиеся с результатами в литературе. Представленный в работе алгоритм может быть рекомендован для практических расчетов термодатчиков и предохранителей с исполнительным элементом в форме винтовой цилиндрической пружины из сплава с эффектом памяти формы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [2] Narahari P.S., Wanhill R.J.H. *Aerospace Materials and Material Technologies. Volume 1: Aerospace Materials*. Springer Science+Business Media, Singapore, 2017, 594 p.
- [3] Kim Jae-II, Kim Hyo-Chul, Byun Hyun-Woo, Kim Su-Min. *Safe Electrical Outlet*. Заявка WO 2014129677 Южная Корея, заявитель Dong-A University Research Foundation for Industry-Academy Cooperation, заявл. 20.02.2013; опубл. 28.08.2014.
- [4] Khandelwal A., Buravalla V. Models for Shape Memory Alloy Behavior: An Overview of Modeling Approaches. *International Journal of Structural Changes in Solids — Mechanics and Applications*, 2009, vol. 1, pp. 111–148.
- [5] Poorasadion S., Arghavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. An Improvement on the Brinson Model for Shape Memory Alloys with Application to Two-

- dimensional beam element. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, vol. 25, pp. 1905–1920.
- [6] Ганыш С.М., Гаврюшин С.С., Андронов И.Н. Экспериментальное определение параметров диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 11, с. 79–83.
- [7] Ганыш С.М., Гаврюшин С.С. Численное моделирование процессов деформирования элемента в форме винтовой цилиндрической пружины, выполненного из материала с эффектом памяти формы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 8, с. 15–20.
- [8] Андреева Л.Е., Пономарева С.Д. *Расчет упругих элементов машин и приборов*. Москва, Машиностроение, 1980, 326 с.
- [9] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 480 с.
- [10] Auricchio F., Scalet G., Urbano M. Numerical/Experimental Study of Nitinol Actuator Springs. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 2420–2428.
- [11] Sung-Min An, J. Ryu, M. Cho, Kyu-Jin Cho. Engineering Design Framework for a Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator Using a Static Two-State Model. *Smart Materials and Structures*, 2012, vol. 21, pp. 1–16.

Статья поступила в редакцию 04.12.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ганыш С.М. Расчет исполнительного элемента предохранительного механизма безопасной электрической розетки, выполненного из сплава с эффектом памяти формы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1914>

**Ганыш Святослав Мирославович** — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: метод конечных элементов, материалы с памятью формы. e-mail: [s.ganysh-rk5@yandex.ru](mailto:s.ganysh-rk5@yandex.ru)

## Numerical simulation of safety device executive element of the shape memory alloy for a safe electrical outlet

© S.M. Ganysh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers possibility of creating a safety element for a safe electrical outlet based on the shape memory effect. Numerical model of helical cylindrical spring of the shape memory alloy is developed. The phenomenological approach based on the phase transition diagram is used to describe material behavior. Shape memory effect is included using additional internal force factor i.e. the shape memory moment under torsion. An algorithm for constructing the relationship between the torque in cross section and the shape memory moment for isothermal loading is presented. The problem of simultaneous deformation of shape memory alloy spring and flat copper spring under heating is solved. The contact plate is replaced by an equivalent spring. Spring stiffness is obtained using a system of nonlinear differential equations describing the bending of a bar.*

**Keywords:** shape memory alloy, helical cylindrical spring, safe electrical outlet

### REFERENCES

- [1] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. *Materials & Design*, 2014, vol. 56, pp. 1078–1113.
- [2] Narahari P.S., Wanhill R.J.H. *Aerospace Materials and Material Technologies. Volume 1: Aerospace Materials*. Singapore, Springer Science+Business Media Publ., 2017, 594 p.
- [3] Kim Jae-Il, Kim Hyo-Chul, Byun Hyun-Woo, Kim Su-Min. *Safe electrical outlet*. Patent Republic of Korea WO 2014129677, 20.02.2013.
- [4] Khandelwal A., Buravalla V. *International Journal of Structural Changes in Solids. Mechanics and Applications*, 2009, vol. 1, pp. 111–148.
- [5] Poorasadion S., Arghavani J., Naghdabadi R., Sohrabpour S. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2013, vol. 25, pp. 1905–1920.
- [6] Ganysh S.M., Gavryushin S.S., Andronov I.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 11, pp. 79–83.
- [7] Ganysh S.M., Gavryushin S.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 8, pp. 15–20.
- [8] Andreeva L.E., Ponomarev S.D. *Raschet uprugikh elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 326 p.
- [9] Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruktsiy mashin i priborov* [Numerical analysis of device and machine elements]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 480 p.
- [10] Auricchio F., Scalet G., Urbano M. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, pp. 2420–2428.
- [11] Sung-Min An., Ryu J., Cho M., Kyu-Jin Cho. *Smart Materials and Structures*, 2012, vol. 21, pp. 1–16.

**Ganysh S.M.** (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009, Assist. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: finite element analysis, shape memory alloys.  
e-mail: s.ganysh-rk5@yandex.ru