

О РЕАКТИВНОМ УСИЛИИ ПРУЖИНЫ РАСТЯЖЕНИЯ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

**АБДРАХМАНОВ С.А., ДЖАНАЛИЕВ Н.Р., КОЖОШОВ Т.Т., ОСМОНКАНОВ А.М.,
ДОТАЛИЕВА Ж.Ж.**
abdrahmanov7@rambler.ru, talant71965@mail.ru

Теоретически определяются реактивные усилия для цилиндрических пружин растяжения, обладающих эффектом памяти формы, а также приведено её сравнение с экспериментальными данными.

Обычные пружины по своей сути, в основном, проектируются и изготавливаются для работы в упругой области деформирования [1]. Но с появлением материалов, обладающих нетрадиционными свойствами, в частности, обладающих эффектом памяти формы, появилась возможность их работы и за пределами упругости [2-6]. Причем, как раз наличие неупругих деформаций в элементах из таких материалов обеспечивает феномен работы пружин за пределом упругости.

В ранее опубликованных работах мы рассматривали цилиндрические пружины растяжения–сжатия при активном и пассивном нагружении, в линейной и в нелинейной постановке [8,9]. Теоретически получили характеристики цилиндрических пружин растяжения за пределом упругости и остаточные удлинения после разгрузки [10].

В данной работе теоретически исследуются реактивные усилия зависящие от остаточных удлинений цилиндрических пружин растяжения, обладающих эффектом памяти формы.

Здесь при термосиловом воздействии на пружину предполагается, что:

а) остаточная неупругая (фазовая) деформация в процессе формовосстановления исчезает полностью;

б) характеристические температуры фазовых превращений не зависят от напряжений;

Анализ диаграмм деформирования рассматриваемой цилиндрической пружины в координатах $P \sim \lambda$ показывает, что до силы P_T данная кривая незначительно отличается от прямой (рис.1).

Следовательно, на данном этапе работы при изотермическом нагружении жёсткость пружины можно считать постоянной. Таким образом, до значения силы P_T можно записать

$$P = C_0 \lambda, \quad (1)$$

где C_0 – жесткость пружины. Очевидно, она равна (рис. 1)

$$C_0 = tg\beta. \quad (2)$$

Если известна диаграмма $P \sim \lambda$ её можно определить из равенства

$$C_0 = \frac{P_T}{\lambda_T}, \quad (3)$$

где [8,9],

$$P_T = \frac{4B}{D_0^2} \sin(\alpha_T - \alpha_0) \frac{\cos^2 \alpha_0 \frac{B}{C} \cos \alpha_T \cos \alpha_0 + \sin \alpha_T \sin \alpha_0}{\left(\frac{B}{C} \cos^2 \alpha_T + \sin^2 \alpha_T \right)^2}, \quad (4)$$

$$\lambda_T = \frac{\pi D i_0}{\cos \alpha_0} (\sin \alpha_T - \sin \alpha_0), \quad (5)$$

здесь α_T является корнем следующего уравнения:

$$P(\alpha) D(\alpha) \cos \alpha = \tau_{\phi T} \frac{\pi d^3}{8}. \quad (6)$$

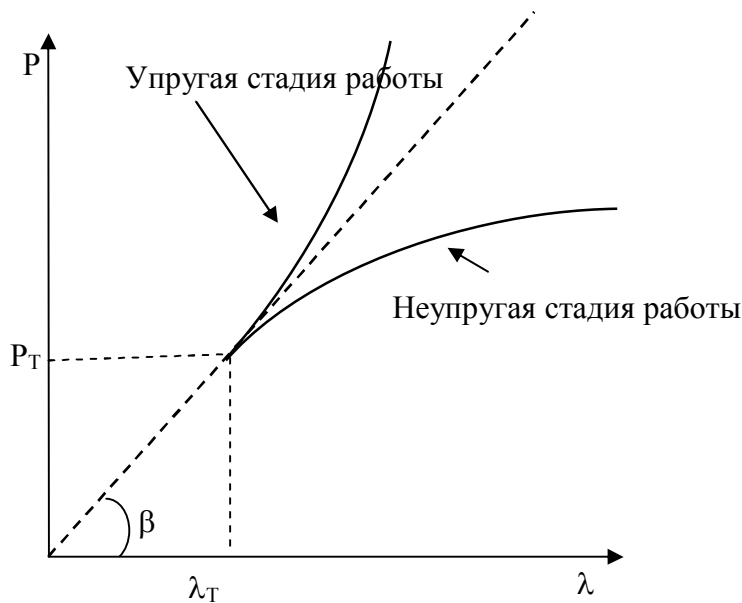


Рис. 1

С точки зрения приложения, центральным является изучение деформационно-силового поведения пружины в процессе нагрева при ограничении смещения её свободного конца. Описанный выше этап должен рассматриваться как взвод пружины в мартенситном состоянии. Отметим, что при нагреве материала наведённая при взводе неупругая (фазовая) деформация исчезает. Причём, в каждый момент она будет распределяться в неупругой зоне вдоль радиуса по линейному закону [3,7].

Для определения реактивной силы, развиваемой в пружине с памятью формы при её нагреве из мартенситной зоны, запишем условие совместности деформаций в виде.

$$d[\lambda_1(R, C_0)] + d[\lambda_2(T)] = d[\lambda_{нф}]. \quad (6)$$

Здесь $\lambda_1(R, C_0)$ - осадка пружины, вызванная реактивной силой; $\lambda_2(T)$ - осадка пружины от температурного воздействия; $\lambda_{нф}$ - осадка пружины, обусловленная памятью формы.

Будем считать, что в процессе нагрева пружина работает в пределах упругости, а сам нагрев происходит от температуры A_H до температуры A_K . В этом случае заменяя в формуле (1) силу P на реактивную силу R , можем записать

$$d\lambda_1 = d\left(\frac{R}{C_0}\right). \quad (7)$$

Здесь C_0 - определяется формулой (3) с учетом (4) и (5).

Температурную осадку пружины можно определить по формуле

$$\lambda_2(T) = H_{пф} \xi(T) \Delta T, \quad (8)$$

где $H_{пф}$ - высота пружин после разгрузки; ΔT - разность температур; $\xi(T)$ - коэффициент теплового расширения материала пружины.

Примем коэффициент теплового расширения $\xi(T)$ в области превращений линейной функцией от T , то есть,

$$\xi(T) = a_\xi + b_\xi T, \quad (9)$$

где a_ξ и b_ξ - постоянные материала.

С учетом последнего выражения найдем осадку пружины при изменении температуры на величину dT .

$$d\lambda_2(T) = H_{пф} \left[\frac{d\xi}{dT} (T - A_H) + \xi(T) \right] dT. \quad (10)$$

Осадка пружины за счет эффекта памяти формы будет равна [3]:

$$d\lambda_{н\phi} = \lambda_{осм} \frac{dT}{A_K - A_H}. \quad (11)$$

Расписывая условие (6) с учетом формул (7), (10) и (11) получаем следующее уравнение для определения реактивной силы R развиваемой пружиной при её нагреве:

$$d\left(\frac{R}{C_0}\right) = \lambda_{осм} \frac{dT}{A_K - A_H} - H_{\text{ПР}} \left[\frac{d\xi}{dT}(T - A_H) + \xi(T) \right] dT. \quad (12)$$

Интегрируя последнее выражение, находим

$$R(T) = C_0(T)(T - A_H) \left[\frac{\lambda_{осм}}{A_K - A_H} - H_{\text{ПР}}\xi(T) \right]. \quad (13)$$

Запишем высоту пружины после разгрузки $H_{\text{ПР}}$ в виде:

$$H_{\text{ПР}} = \lambda_{осм} + H_0,$$

где $\lambda_{осм}$ - остаточное удлинение, H_0 - начальная высота пружины, которая равна $l_0 \sin \alpha_0$. С учетом этого уравнение (13) перепишем в виде

$$R(T) = C_0(T)(T - A_H) \left[\frac{\lambda_{осм}}{A_K - A_H} - (\lambda_{осм} + l_0 \sin \alpha_0)\xi(T) \right]. \quad (14)$$

Очевидно, максимальное значение реактивной силы будет при температуре $T = A_K$, т.е.

$$R_{\text{max}} = R(A_K) = C_0(A_K) \left[\lambda_{осм} - (\lambda_{осм} + H_0)(A_K - A_H)\xi(A_K) \right]. \quad (15)$$

Для получения графических характеристик пружины нами произведен расчет цилиндрической пружины растяжения, изготовленной из никелида титана, имеющего следующие параметры: модуль продольной упругости $E_M = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и $E_A = 20,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, модуль сдвига $G_M = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и $G_A = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, диаметр пружины $D_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, диаметр прутка $d_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, количество витков $i_0 = 10$.

На рисунках 2 – 6 показаны графики результатов расчетов полученных при термосиловом воздействии на пружину.

Из рис. 7 видно что, максимальное расхождение теоретических результатов от экспериментальных не более 12%.

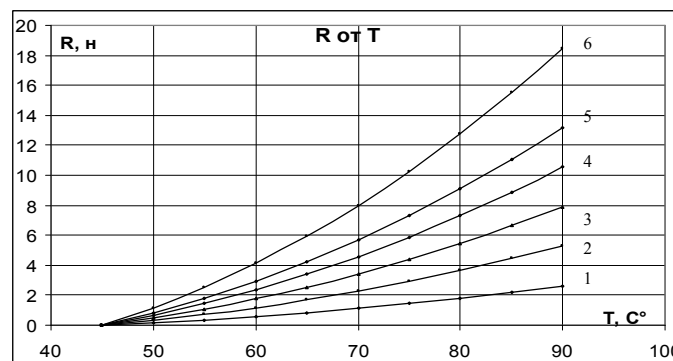


Рис. 2. Зависимость реактивного усилия от температуры. Кривые 1- 6 отнесены к остаточным удлинениям ($\lambda_{осм}$), которые соответственно равны: 0,5; 2,07; 2,7; 3,45; 11,52; 24,92 мм.

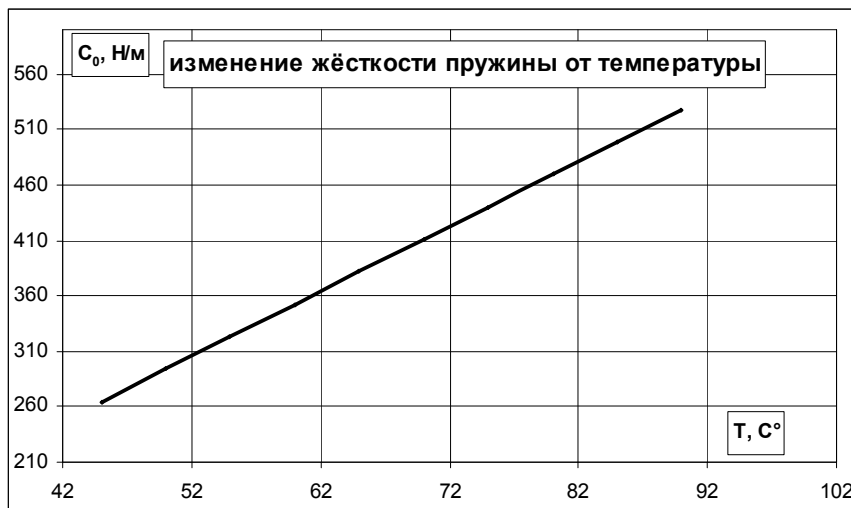


Рис. 3. Изменение жёсткости пружины в температурном интервале от A_H до A_K .

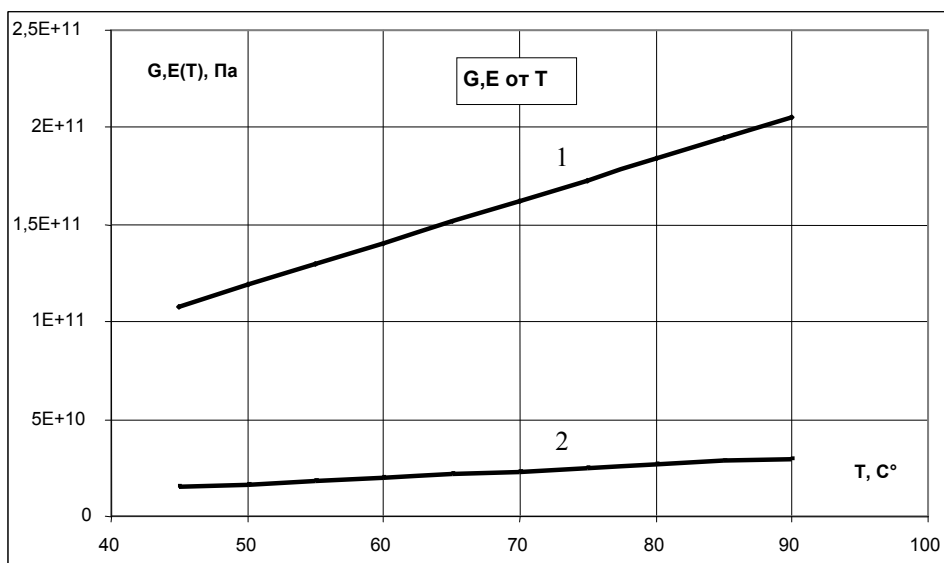


Рис. 4. Зависимости изменения модулей продольной упругости (E) прямая 1 и сдвига (G) прямая 2 в температурном интервале от A_H до A_K .

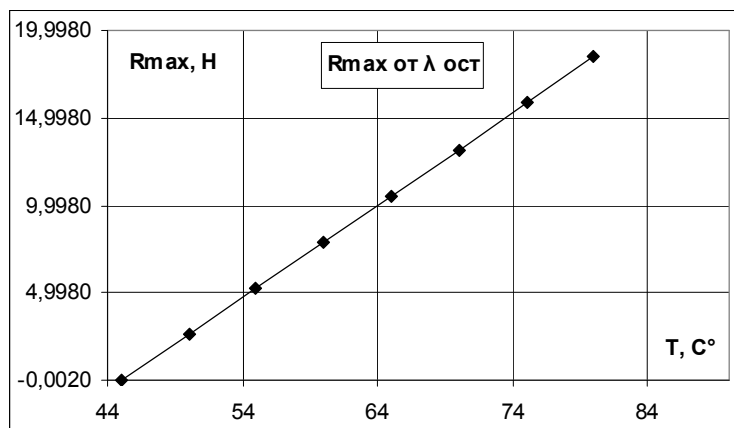


Рис. 5. Зависимость максимального реактивного усилия от температуры

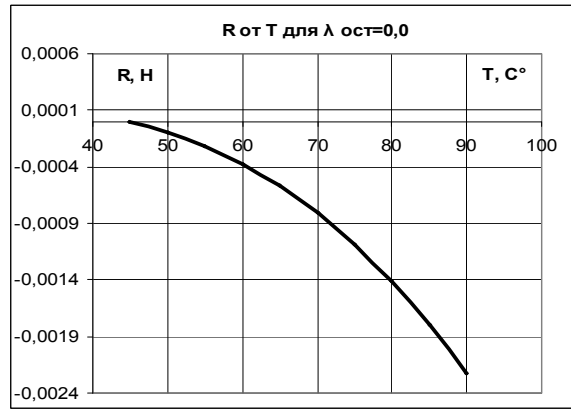


Рис. 6. Зависимость реактивного усилия для $\lambda_{ост} = 0$; в температурном интервале от A_H до A_K .

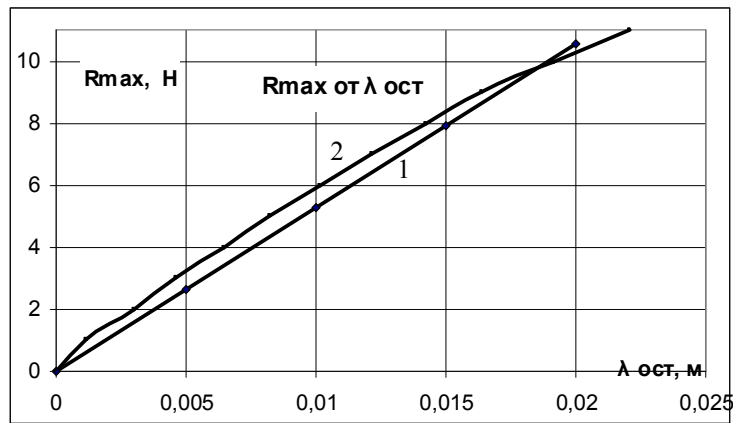


Рис. 7. Зависимость максимального реактивного усилия от остаточных удлинений; 1- теоретическая, 2- экспериментальная.

Литература

1. Пономарев С.Д. и др. Расчет на прочность в машиностроении, Т-1, Машгиз, , М.: 1956. -881 с.
2. Материалы с эффектом памяти формы. Т.4 Справочное издание под общей ред. Лихачева В.А., Санкт-Петербург, 1998,- 268с.
3. Абдрахманов С.А. Деформация материалов с памятью формы при термосиловом воздействии. Бишкек, Илим, 1991,-116с.
4. Лихачев В.А. и др. Эффект памяти формы. – Л.: Из-во ЛГУ, 1987, -216 с.
5. Мовчан А.А., Мовчан И.А. Модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы в активных процессах прямого превращения и структурного перехода. - Механика композиционных материалов и конструкций. М.: 2008, том 14, №1, с 75 – 87.
6. Ооцука К., Симудзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы /Под ред. Фунакуба Х. Пер. с японск. – М. Металлургия. 1990. с 196-224.
7. Чернышев Н.А. Напряженное состояние и деформация цилиндрических пружин, свитых из круглого прутка. – в кн. Динамика и прочность машин. М.: АН СССР, 1950, с. 7-78.
8. Абдрахманов С. А. Кожошов Т. Т. Характеристики цилиндрических пружин растяжения, изготовленных из материала обладающего памятью формы. Известия КГТУ им. И. Раззакова 14/2008 с.106-112.
9. Абдрахманов С. А. Кожошов Т. Т. О работе цилиндрической пружины, обладающей эффектом памяти формы. Т. 1, Материалы III международной научной конференции «Актуальные проблемы механики» 17-19 июня 2009, Алматы, Казахстан статья с. 143-146.
10. Абдрахманов С. А. Кожошов Т. Т. Аналитическое исследование характеристики цилиндрических пружин с памятью формы. - Механика композиционных материалов и конструкций. М.: 2010, №1, с 165 – 171.