

11. Aniskin NA Temperature-filtration mode and the base of the dam hydroelectric Kureiskaya second right bank lowered. - M. Herald MGSU 2/2006. 43-52 p.

УДК 539.47

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕАКТИВНЫХ УСИЛИЙ СОСТАВНЫХ ПРУЖИН

С.А. Абдрахманов, Ж.Ж. Доталиева, М.Б. Джолдошбаева, Джанузакова А.А., Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира, 66, e-mail: zh.dotalieva@gmail.com

Целью данной работы является теоретическое изучение генерации реактивных усилий, развиваемых рассматриваемой конструкцией, включающих составные пружины, одна из которых изготовлена из материала с памятью формы, при различных соединениях.

Рассмотрены процессы нагрузки, разгрузки, а также вопросы генерации реактивных усилий при их нагреве в области температур фазового перехода. Известно, что пружины, как правило, в основном работают в упругой области их деформирования. Но с появлением нового класса материалов, в частности, обладающих эффектом памяти формы, рабочая область деформирования пружин расширяется и может включать и неупругую зону. Следовательно, изучение условия деформирования пружин за пределами упругости является важной задачей. В данной работе сделан анализ генерации реактивных усилий пружин при их совместной работе с пружиной, не обладающей эффектом памяти формы. Получена зависимость величины максимального реактивного усилия от величины нагрузки в момент разгрузки. Сделано сравнение полученных результатов при параллельном и последовательном соединении пружин.

Ключевые слова: составные пружины, жесткость пружины, модуль сдвига, упругая и неупругая работа, осевое перемещение, напряжения, растягивающее усилие, реактивное усилие.

ABOUT DETERMINATION REACTION FORCE OF COMPOSITE COIL SPRINGS

S.A. Abdrahmanov, Zh.Zh. Dotalieva, M.B. Dzholdoshbaeva, A.A. Djanuzakova, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Mira ave. 66, e-mail: zh.dotalieva@gmail.com

The aim of this work is a theoretical study of the generation of reactive force exerted by the construction under consideration, including the components of the spring, one of which is made of a shape memory material, with various compounds. Considered the processes of loading and unloading, as well as issues of generation of reactive force when they are heated in the temperature range of the phase transition. It is known that the springs tend to work mainly in the region of their elastic deformation. But with the advent of a new class of materials, in particular having a shape memory effect, the deformation of the springs working area expands and may include resilient zone. Therefore, the study of the deformation conditions of the springs outside of elasticity is an important task. In this paper we made an analysis of the generation of reactive force of the spring when they work together with the spring, not having a shape memory effect. Received the dependence of the maximum reactive force of the load at the time of discharge. Done to compare the results with parallel and series connection springs.

Keywords: composite spring, spring, shear modulus, elastic and inelastic work, axial displacement, stress, tension force, reactive force.

Эффект памяти формы (ЭФП) и генерация реактивных усилий, как известно, проявляются только при наличии неупругих деформаций (мартенситной природы) [1,2,3], в связи с этим, важными этапами при проектировании конструкций, работающих за пределом упругости, являются: определение предельной нагрузки, после которой возникают неупругие деформации, в дальнейшем их будем называть фазовыми деформациями; определение величин неупругих деформаций; вопросы разгрузки и изучение остаточных деформаций, и наконец, исследование реактивных усилий, возникающих в условиях воспрепятствования ее формовосстановлению.

В данной работе рассматриваются составные пружины, одна из которых обладает свойством памяти формы. Диаграмму сдвига этой пружины примем в виде двухзвенной ломаной линии. В упругой области деформирования модуль сдвига $G_2 = G_\mu$, где G_μ - модуль сдвига материала в мартенситном состоянии, в неупругой области этот модуль равен nG_μ , где n - безразмерный параметр, характеризующий степень упрочнения материала ($0 \leq n \leq 1$). Касательное напряжение, соответствующее началу фазовой текучести второй пружины, обозначим через $\tau_{фт}$. Учитывая, что $\tau_{фт}$ намного меньше дислокационного предела текучести,

считаем, что при изотермическом нагревании во второй пружине возникают неупругие деформации только мартенситной природы, т.е. фазовые деформации.

Рассматриваются два вида соединения пружин: последовательное и параллельное.

Пусть **последовательно** соединенные пружины растягиваются силой P .

В **упругом** случае связь между осевым перемещением λ и воспринимаемой нагрузкой P для пружин в упругой области их деформирования будет:

$$\lambda_1 = \frac{P}{z_1}, \quad \lambda_2 = \frac{P}{z_2}, \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – соответственно жесткости пружин, которые определяются через геометрические и механические параметры пружин, т.е.

$$z_1 = \frac{G_1 d_1^4}{8 D_1^3 i_1}, \quad z_2 = \frac{G_2 d_2^4}{8 D_2^3 i_2}. \quad (2)$$

Здесь D и d – соответственно диаметры пружин и проволоки; i – количество витков соответствующих пружин.

Очевидно, что полное перемещение конца пружины будет:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{P}{z}, \quad (3)$$

где z – жесткость составной пружины. С учетом формулы (1) она равна

$$z = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}. \quad (4)$$

Если максимальные касательные напряжения во второй пружине меньше значения $\tau_{фТ}$, то рассматриваемая система будет работать в упругой области деформирования. Используя данное условие, найдем значение нагрузки, после которой она переходит в неупругую область:

$$P_{фТ} = \frac{\pi d_2^3}{8 D_2} \tau_{фТ}. \quad (5)$$

Подставляя значение $P_{фТ}$ в формулы (1) и (3), имеем:

$$\lambda_{2фТ} = \frac{P_{фТ}}{z_2} = \frac{\pi D_2^2 i}{G_2 d_2} \tau_{фТ}; \quad \lambda_{фТ} = \lambda_{2фТ} \frac{z_2}{z}. \quad (6)$$

С учетом последних формул зависимость осевого перемещения от нагрузки для данной системы в безразмерном виде запишется:

$$\bar{\lambda} = \bar{P}, \quad (7)$$

где $\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_{фТ}$, $\bar{P} = P/P_{фТ}$ – соответственно, безразмерные осевое перемещение и растягивающая сила.

Неупругая работа отдельной цилиндрической пружины растяжения рассмотрена в работе [3]. Для осевого перемещения такой пружины получена формула

$$\lambda_2 = \frac{P}{k(n,\rho) \cdot z_2}, \quad (8)$$

где $k(n,\rho)$ - коэффициент падения жесткости на кручение за счет появления неупругих деформаций; $\rho = \frac{r_{фТ}}{r_0}$ - безразмерный параметр, характеризующий глубину зоны неупругих деформаций. Здесь $r_0 = \frac{d_2}{2}$ - радиус прутка, $r_{фТ}$ - радиус прутка, где касательные напряжения равны $\tau_{фТ}$. Для $k(n,\rho)$ нами получена следующая формула:

$$k(n,\rho) = \frac{\rho}{3} (4 - \rho^3) + n (1 - \frac{4}{3} \rho + \frac{1}{3} \rho^4). \quad (9)$$

С учетом формулы (8) полное осевое перемещение пружины запишется в виде:

$$\lambda = \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{k(n,\rho) z_2} \right) P. \quad (10)$$

В безразмерном виде последнюю формулу можно привести к виду:

$$\bar{\lambda} = \frac{[k(n,\rho) + c]}{k(n,\rho)(1+c)} \bar{P}. \quad (11)$$

Здесь $c = \frac{z_1}{z_2}$.

Перепишем формулу (11) в виде:

$$\bar{\lambda} = \frac{1 + \frac{k(n,\rho)}{c}}{k(n,\rho)(1 + \frac{1}{c})} \bar{P}. \quad (12)$$

При последовательном соединении пружин можно показать, что параметр ρ , характеризующий глубину зоны неупругих деформаций, связан с безразмерным осевым перемещением пружины с памятью формы $\bar{\lambda}_2$ следующей зависимостью:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_2}. \quad (13)$$

Здесь $\bar{\lambda}_2 = \lambda_2/\lambda_{2фТ}$.

Учитывая, что $\lambda_2 = P/k(n,\rho)z_2$, а $\lambda_{2фТ} = P_{фТ}/z_2$, для $\bar{\lambda}_2$ получаем следующую формулу:

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{\bar{P}}{k(n,\rho)}, \quad (14)$$

где $\bar{P} = P/P_{\text{фт}}$ ($P \geq P_{\text{фт}}$).

В рассматриваемом случае диаграмма деформирования пружин в упругом случае ($\bar{P} \leq 1$) строится на основании зависимости (7), а в случае неупругой деформации второй пружины ($\bar{P} > 1$) - на основании формулы (11).

При **параллельном** соединении пружины растягиваются силой P в осевом направлении. В **упругом** случае осевые перемещения пружин (λ) через растягивающие их усилия (N) определяются формулами

$$\lambda_1 = \frac{N_1}{z_1}, \quad \lambda_2 = \frac{N_2}{z_2}. \quad (15)$$

Уравнение равновесия и условие совместности деформации этой системы запишется в следующем виде:

$$N_1 + N_2 = P, \quad \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda. \quad (16)$$

Решая уравнения (15) и (16), находим усилия в пружинах, а также связь осевого перемещения пружин с растягивающей силой P в виде:

$$N_1 = \frac{c}{1+c} P, \quad N_2 = \frac{1}{1+c} P, \quad \lambda = \frac{P}{z}, \quad (17)$$

где z – жесткость параллельно соединенных пружин. Она равна:

$$z = z_1 + z_2. \quad (18)$$

Найдем силу $P_{\text{фт}}$, после достижения которой 2-ая пружина переходит в неупругое состояние. Очевидно, что при этом $N_2 = N_{2\text{фт}}$, а величина $N_{2\text{фт}}$ должна определяться формулой (5). Тогда из формулы (17) для рассматриваемого случая получаем:

$$P_{\text{фт}} = (1 + c) \frac{\pi d_2^3}{8D_2} \tau_{\text{фт}}. \quad (19)$$

При этом согласно формуле (17) величина осевого перемещения пружины будет:

$$\lambda_{\text{фт}} = \frac{P_{\text{фт}}}{z}. \quad (20)$$

Используя последние формулы, запишем в безразмерном виде зависимость усилий и осевого перемещения данной системы от нагрузки:

$$\bar{N}_1 = \frac{c}{1+c} \bar{P}, \quad \bar{N}_2 = \frac{1}{1+c} \bar{P}, \quad \bar{\lambda} = \bar{P}. \quad (21)$$

Здесь $\bar{N}_1 = \frac{N_1}{P_{\text{фт}}}$, $\bar{N}_2 = \frac{N_2}{P_{\text{фт}}}$, $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{фт}}}$, $\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{фт}}}$, где величины $P_{\text{фт}}$ и $\lambda_{\text{фт}}$ находятся из формул (19) и (20).

В **неупругом** случае уравнения равновесия и совместности деформаций остаются справедливыми и определяются формулами (16), но в них перемещение 2-ой пружины определяется на основании формулы (8) в виде:

$$\lambda_2 = \frac{N_2}{k(n,\rho)z_2}. \quad (22)$$

Разрешая эти уравнения, получаем:

$$N_1 = \frac{c}{k(n,\rho)+c} P, \quad N_2 = \frac{k(n,\rho)}{k(n,\rho)+c} P. \quad (23)$$

Связь удлинений с растягивающей силой P находим из формул (15) или (22) в виде:

$$\lambda = \frac{cP}{(k(n,\rho)+c)z_1} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{P}{(k(n,\rho)+c)z_2}. \quad (24)$$

Запишем зависимости (23) и (24) в безразмерном виде:

$$\bar{N}_1 = \frac{c}{k(n,\rho)+c} \bar{P}, \quad \bar{N}_2 = \frac{k(n,\rho)}{k(n,\rho)+c} \bar{P}, \quad \bar{\lambda} = \frac{1+c}{k(n,\rho)+c} \bar{P}. \quad (25)$$

При параллельном соединении усилия и перемещения пружин в упругом случае определяются формулами (21), а в случае перехода второй пружины в неупругое состояние – формулами (25). Учитывая, что по условию совместности деформаций $\lambda_2 = \lambda$, можно показать, что

$$\bar{\lambda}_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{2\text{фт}}} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{фт}}} = \bar{\lambda}. \quad (26)$$

Рассмотрим процесс **разгрузки** последовательно соединенных пружин с некоторой нагрузкой $P_p \geq P_{\text{фт}}$, определяемой формулой (5). Считаем, что разгрузка осуществляется по упругому закону. Очевидно, что при полной разгрузке остаточные усилия в пружинах будут равны нулю, а остаточное удлинение на основании формул (7) и (11) составит

$$\bar{\lambda}_{\text{ост}} = \bar{\lambda}_p - \lambda_p^y = \frac{c(1-k_p)}{k_p(1+c)} \bar{P}_p. \quad (27)$$

Здесь $\bar{\lambda}_{\text{ост}} = \lambda_{\text{ост}}/\lambda_{\text{фт}}$, где величина $\lambda_{\text{фт}}$ определяется формулой (6); $k_p = k(n, \rho_p)$ – значение коэффициента $k(n, \rho)$ в момент разгрузки от силы $\bar{P}_p = P_p/P_{\text{фт}}$, при этом параметр ρ , соответствующий силе P_p , равен ρ_p .

Процесс **разгрузки параллельно соединенных пружин** происходит с некоторой нагрузкой P_p по величине, большей $P_{\text{фт}}$. В этом случае нагрузка $P_{\text{фт}}$ определяется формулой (19). Поступая аналогично вышеизложенному случаю и используя формулы (25), получаем:

$$\bar{\lambda}_{\text{ост}} = \frac{1-k_p}{k_p+c} \bar{P}_p. \quad (28)$$

Вычитая от усилий в стержнях при нагрузке P_p их значения, определяемые при их упругой работе, получаем значения остаточных усилий при полной разгрузке данной конструкции. В безразмерном виде они запишутся в следующем виде:

$$\bar{N}_1^{\text{ост}} = \frac{c(1-k_p)}{(1+c)(k_p+c)} \bar{P}_p, \quad \bar{N}_2^{\text{ост}} = \frac{c(k_p-1)}{(1+c)(k_p+c)} \bar{P}_p. \quad (29)$$

Здесь $\bar{N}_1^{\text{ост}} = N_1^{\text{ост}}/P_{\text{фт}}$, $\bar{N}_2^{\text{ост}} = N_2^{\text{ост}}/P_{\text{фт}}$.

Замечая, что $k_p < 1$, из последних формул видим, что $\bar{N}_1^{\text{ост}} > 0$, а $\bar{N}_2^{\text{ост}} < 0$, причем $\bar{N}_1^{\text{ост}} = |\bar{N}_2^{\text{ост}}|$.

Таким образом, в процессе полной разгрузки первая пружина растягивается, а вторая пружина сжимается усилием $\bar{N}_1^{\text{ост}}$.

При определении **реактивного усилия**, развиваемого пружиной, обладающей эффектом памяти формы, будем считать, что остаточная фазовая деформация в процессе формовосстановления исчезает полностью и характеристические температуры фазовых превращений не зависят от напряжений.

Рассмотрим процесс нагрева пружины с памятью формы (в нашем случае второй пружины) только в области температур фазового перехода, т.е. от A_n до A_k .

При **последовательном соединении** пружин условие совместности деформаций при изменении температуры нагрева на величину dT запишется в виде:

$$d(\lambda_1 + \lambda_{2R} + \lambda_{2t}) = d\lambda_{\text{пф}}. \quad (30)$$

Здесь - λ_1 и λ_{2R} - осадка первой и второй пружины от действия реактивной силы R ; λ_{2t} - температурная осадка второй пружины; $\lambda_{\text{пф}}$ - осадка пружины, обусловленная памятью формы.

В дальнейшем считается, что процесс формовосстановления происходит упруго, т.е. возникающая при нагреве реактивная сила не вызывает в пружине с памятью формы появления неупругих фазовых деформаций. Следовательно, можем записать

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_{2R} = \frac{R}{Z}. \quad (31)$$

Можно показать, что температурная осадка пружины равна

$$\lambda_{2t} = H_{\text{нр}} \xi(T)(T - A_n), \quad (32)$$

где $H_{\text{нр}}$ - высота пружины после разгрузки перед ее нагреванием, $\xi(T)$ - коэффициент температурного расширения материала пружины.

Пусть $\xi(T)$ меняется по линейному закону, т.е.

$$\xi(T) = a_\xi + b_\xi T.$$

Здесь a_ξ, b_ξ - экспериментально определяемые коэффициенты.

Тогда

$$d\lambda_{2t} = H_{\text{нр}} [b_\xi(T - A_n) + \xi(T)] dT. \quad (33)$$

При нагреве накопленная фазовая деформация при кручении исчезает в зависимости от температуры по линейному закону [3]. Следовательно, можем записать:

$$\lambda_{\text{пф}} = \frac{\lambda_{\text{ост}}}{A_k - A_n} (T - A_n). \quad (34)$$

Откуда

$$d\lambda_{\text{пф}} = \frac{\lambda_{\text{ост}}}{A_k - A_n} dT. \quad (35)$$

С учетом вышеприведенных формул уравнение (30) запишется в виде:

$$d\left(\frac{R}{Z}\right) = \left\{ \frac{\lambda_{\text{ост}}}{A_k - A_n} - H_{\text{нр}} [b_\xi(T - A_n) + \xi(T)] \right\} dT.$$

Интегрируя последнее уравнение от A_n до T и учитывая, что при $T = A_n$ реактивная сила R должна быть равна нулю, получаем

$$R(T) = z(T) [T - A_n] \left[\frac{\lambda_{\text{ост}}}{A_k - A_n} - H_{\text{нр}} \xi(T) \right]. \quad (36)$$

Здесь

$$z(T) = \frac{z_1 z_2(T)}{z_1 + z_2(T)}. \quad (37)$$

Считая в формуле (36) второе слагаемое малым по сравнению с первым и пренебрегая им, запишем:

$$R(T) = z(T) \frac{T - A_n}{A_k - A_n} \lambda_{\text{ост}}. \quad (38)$$

В безразмерном виде последняя формула запишется:

$$\bar{R}(T) = \frac{z(T)}{z} \frac{T - A_n}{A_k - A_n} \bar{\lambda}_{\text{ост}}. \quad (39)$$

Здесь $\bar{R}(T) = R(T)/P_{\text{фт}}$, где $P_{\text{фт}}$ определяется по формуле (5).

Определим максимальную реактивную силу, развиваемую последовательно соединенной пружиной. Из формулы (39) находим:

$$\bar{R}_{\text{max}} = \bar{R}(A_k) = \frac{z(A_k)}{z} \bar{\lambda}_{\text{ост}}. \quad (40)$$

Подставляя значение остаточного удлинения пружины, выраженное через усилие разгрузки \bar{P}_p , можно получить

$$\bar{R}_{max} = \frac{c(1-k_p)}{k_p[1+c(A_K)]} \bar{P}_p. \tag{41}$$

Здесь $c(A_K) = z_1/z_2(A_K)$.

Теперь рассмотрим процесс определения реактивной силы при **параллельном соединении** пружин. В данном случае условие совместности деформаций запишется в виде:

$$d\lambda_1 = d\lambda_2 = d\lambda_{\text{пф}}, \tag{42}$$

где $\lambda_1 = R_1/z_1$, $\lambda_2 = \frac{R_2}{z_2} + \lambda_{2\text{фг}}$

Здесь R_1 и R_2 – реактивные усилия в первой и во второй пружине.

Уравнение равновесия в данном случае имеет вид:

$$R_1 + R_2 + N_1^{\text{ост}} + N_2^{\text{ост}} = R. \tag{43}$$

Решая уравнения (42) и (43) совместно с учетом формул, рассмотренных при последовательном соединении пружин, получаем для реактивного усилия следующую формулу

$$R(T) = \left\{ [1 + c(T)] \frac{\lambda_{\text{ост}}}{A_K - A_H} H_{\text{нр}} \xi(T) \right\} z(T) [T - A_H]. \tag{44}$$

Аналогично предыдущему случаю, пренебрегая вторым слагаемым в виду его малости, получаем

$$R(T) = \frac{\lambda_{\text{ост}}(T - A_H)}{A_K - A_H} [1 + c(T)] z(T). \tag{45}$$

Найдем значение максимальной реактивной силы. Очевидно, она будет равна

$$R_{max} = R(A_K) = \lambda_{\text{ост}} [1 + c(A_K)] z_2(A_K). \tag{46}$$

Приведем последнюю формулу к безразмерному виду, поделив ее на $P_{\text{фт}}$ определяемой формулой (19). Тогда

$$\bar{R}_{max} = \frac{1+c(A_K)}{1+c} \frac{z_2(A_K)}{z_2} \bar{\lambda}_{\text{ост}}. \tag{47}$$

Подставляя в последнюю формулу значение $\bar{\lambda}_{\text{ост}}$, получаем

$$\bar{R}_{max} = \frac{1+c(A_K)}{1+c} \frac{c}{c(A_K)} \frac{1-k_p}{k_p-c} \bar{P}. \tag{48}$$

Здесь учтено, что $\frac{z_2(A_K)}{z_2} = \frac{c}{c(A_K)}$.

На рис.1 приведены зависимости максимальных реактивных усилий (\bar{R}_{max}) от значения нагрузки в момент разгрузки (\bar{P}_p). В расчетах принималось, что жесткость пружины с памятью формы в аустенитном состоянии в два раза больше её значения в мартенсите.

Из этих графиков очевидно, что при разгрузке с некоторого значения \bar{P}_p величина реактивного усилия \bar{R}_{max} может превышать значение нагрузки \bar{P}_p , особенно при последовательном соединении пружин.

Выводы: Получены зависимости осевых перемещений пружин от нагрузки при последовательном и параллельном их соединении с учетом неупругой деформации.

Выведены формулы для вычисления остаточных перемещений пружин в зависимости от усилий разгрузки.

Определены величины реактивных усилий развиваемых пружинами при рассмотренных видах соединений и сделан их анализ.

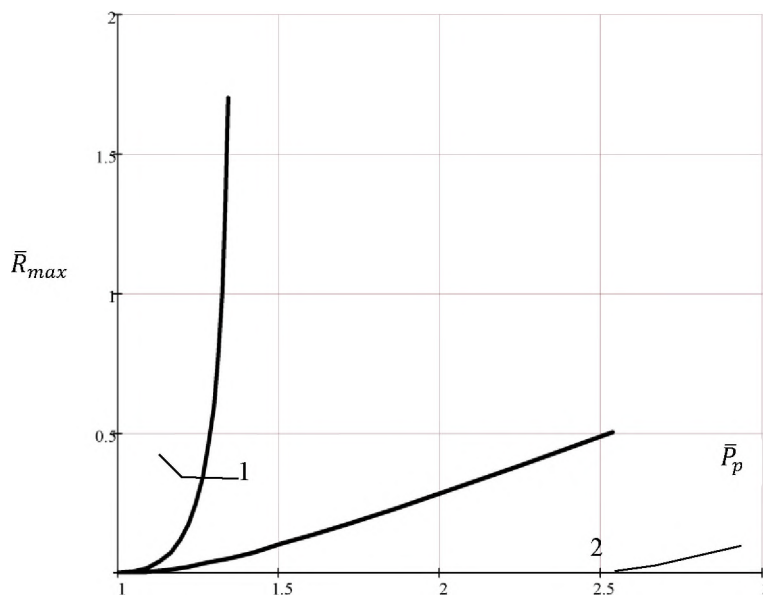


Рис.1. Зависимости \bar{R}_{max} от \bar{P}_p при последовательном (линия 1) и при параллельном (линия 2) соединении пружин. Эти кривые построены при параметрах $c = 1,5$ и $n = 0.01$.

Список литературы

1. Лихачев В.А. и др. Эффект памяти формы. – Л.: Из-во ЛГУ, 1987, 216с.
2. Мовчан А.А. Микромеханические определяющие уравнения для сплавов с памятью формы //Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 6. С. 47-53.
3. Абдрахманов С.А. Деформация материалов с памятью формы при термосиловом воздействии. //Бишкек, «Илим», 1991, 116с.

References

1. V.A. Likhachev and others. The shape memory effect. - L.: publishing house LSU, Leningrad, 1987, 216p.
2. A.A. Movchan. Micromechanical constitutive equations for shape memory alloys. //Problems of mechanical engineering and reliability of the machines. 1994. №6. P. 47-53.
3. Abdrakhmanov S.A. Deformation of shape memory materials with thermo- exposure. //Bishkek "Ilim", 1991, 116p.

УДК 539.47

О НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ФАСОННОЙ ПРУЖИНЫ

С.А. Абдрахманов, Абдыжапар Асыл, Ж.Ж. Доталиева, А.А. Джанузакова, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира, 66, e-mail: sasv1b@mail.ru

Цель статьи – получение зависимости крутящего момента от относительного угла закручивания для сплошного вала при его деформировании в неупругой области. В работе рассматривается проблемный вопрос определения осевых перемещений любых фасонных пружин в неупругой области её деформирования.

Ключевые слова: эффект памяти формы, фасонная пружина, осевые перемещения, угол закручивания, крутящий момент.

ABOUT INELASTIC DEFORMATION OF SHAPED SPRINGS

S.A. Abdrakhmanov, Abdyjapar Asyl, Zh.Zh. Dotalieva, A.A. Djanuzakova, **S.A. Abdrakhmanov, Zh.Zh. Dotalieva, M.B. Dzholdoshbaeva, A.A. Djanuzakova**, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Mir ave. 66, e-mail: sasv1b@mail.ru

The purpose of the article - receiving torque depending on the relative angle of twist for a solid shaft when it is deformed in the inelastic region. The paper deals with the problematic issue of determining the axial displacement of any shaped springs in the inelastic region of its deformation.

Keywords: shape memory effect, shaped spring, axial displacement, angle of twist, torque.

Как правило, пружины работают в упругой области деформирования. Но с появлением материалов с эффектом памяти формы актуальным становится вопрос работы пружин в неупругой области.

Рассмотрим вопрос определения осевых перемещений пружин с малым шагом подъёма, работающих на растяжение (сжатие). Как известно [1], при этом витки пружины, в основном, испытывают кручение. Пусть элемент пружины длиной ds закручен на угол $d\varphi$. Тогда из геометрических соображений для осевого перемещения пружины $d\lambda$ можно записать следующее выражение:

$$d\lambda = R d\varphi. \quad (1)$$

Здесь $R = R(s)$ – радиус пружины.

Учитывая, что относительный угол закручивания $\theta = d\varphi/ds$, формулу (1) запишем в виде:

$$d\lambda = R\theta ds. \quad (2)$$

При известной зависимости относительного угла закручивания от крутящего момента путём интегрирования выражения (2) можно получить величину осевого перемещения пружины как в упругой, так и в