

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ КОНИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ
ФОРМЫ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ СПЛАВА ТН-20**

*Абдыжапар Асылбек - преподаватель, Кафедра “Механика и промышленная инженерия»,
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек,
720044, пр. Ч. Айтматова, 66, тел.: +996312545150, abdyjaparasylybek@gmail.com*

*Абдрахманов Сарбагыш Абдрахманович - д.ф.-м.н., проф., Кафедра “Механика и
промышленная инженерия, Кыргызский государственный технический университет им.
И. Раззакова, г. Бишкек, 720044, пр. Ч. Айтматова, 66, тел.: +996312545150
abdrahmanov7@rambler.ru*

Доталиева Жаныгул Жолдошбаевна - к.ф.-м.н., доц., Кафедра "Механика и промышленная инженерия, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, 720044, пр. Ч. Айтматова, 66, тел.: +996312545150 zh.dotalieva@gmail.com

Джолдошбаева Мээрим Бактыбековна - преподаватель, Кафедра "Механика и промышленная инженерия Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, 720044, пр. Ч. Айтматова, 66, тел.: +996312545150 meerimdzholdoshbaeva@gmail.com

В работе приводится анализ и сравнение результатов, полученных аналитически и экспериментально, для конических пружин, обладающих эффектом памяти формы, изготовленных из сплава ТН-20. Определена величина параметра упрочнения материала, обеспечивающая достаточно хорошее совпадение экспериментальных и теоретических результатов.

Ключевые слова: коническая пружина, осевое удлинение, кручение, изотермическое нагружение, память формы, реактивное усилие.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESULTS FOR THE CONIC SPRING WITH EFFECT OF THE SHAPE MEMORY MADE OF TN-20 ALLOY

Abdyjapar Asylbek - lecturer, Department "Mechanics and Industrial engineering", Kyrgyz State Technical University named by I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aytmatov av., 66, tel.: +996312545150 E-mail: abdyjaparasylbek@gmail.com

Abdrachmanov Sarbagysh - d.ph.m.s., prof., Department "Mechanics and Industrial Engineering", Kyrgyz State Technical University named by I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aytmatov av., 66, tel.: +996312545150 E-mail: abdrahmanov7@rambler.ru

Dotalieva Janygul - c.ph.m.s., ass. Prof., Department "Mechanics and Industrial engineering", Kyrgyz State Technical University named by I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aytmatov av., 66, tel.: +996312545150 E-mail: zh.dotalieva@gmail.com

Dzholdoshbaeva Meerim - lecturer, Department "Mechanics and Industrial engineering", Kyrgyz State Technical University named by I. Razzakov, Bishkek, 720044, Ch. Aytmatov av., 66, tel.: +996312545150 E-mail: meerimdzholdoshbaeva@gmail.com

The analysis and comparison of the results, received analytically and experimentally, for the conic springs with the effect of shape memory, made of TN-20 alloy, is provided in work. The material hardening parameter size, providing rather good coincidence of experimental and theoretical results, is determined.

Keywords: conic spring, axial lengthening, torsion, isothermal loading, shape memory, recovery force.

В данной статье приведены результаты аналитического определения реактивных усилий конических пружин, растянутых за предел упругости. Они возникают в результате стеснённого формовосстановления пружины после её разгрузки и последующего нагревания. Данная задача разбита на три этапа: 1) получение характеристики пружины за пределом упругих деформаций, т.е. зависимости «нагрузка-осевое перемещение» ($P \sim \lambda$); 2) разгрузка и определение величин остаточных перемещений $\lambda_{ост}$; 3) нагрев пружины в области температур фазовых превращений и определение генерируемых при этом реактивных усилий.

При решении 1-го этапа данной задачи принимались следующие исходные положения. В начале пружина деформируется изотермически в области существования устойчивой мартенситной фазы при температуре T_0 . При растяжении пружины витки её работают, в основном, на кручение. Диаграмма сдвига материала в мартенситном состоянии принята в виде двухзвенной ломаной с модулями сдвига G_M и nG_M , где n – параметр упрочнения ($0 \leq n \leq 1$).

Значение крутящего момента M и относительного угла закручивания прутка θ , при котором заканчивается упругая работы пружины, определяются формулами:

$$M_{\text{фт}} = \tau_{\text{фт}}^M W_\rho; \quad \theta_{\text{фт}} = \frac{\tau_{\text{фт}}^M}{G_M \cdot r_0}. \quad (1)$$

Здесь $\tau_{\text{фт}}^M$ – касательное напряжение, соответствующее началу фазовой текучести материала в мартенситном состоянии; W_ρ – момент сопротивления кручению; r_0 – радиус прутка.

Для определения осевого перемещения используется следующая зависимость:

$$d\lambda = r^2 \theta(M) d\varphi. \quad (2)$$

Здесь $\theta(M)$ – относительный угол закручивания прутка, зависящий от крутящего момента $M = P \cdot r$; r – текущий радиус пружины; φ – угловая координата.

Известно [1], что использование формулы (2) в упругом случае приводит к следующим результатам:

– для пружин с постоянным углом подъёма:

$$\lambda = \frac{P(r_2^3 - r_1^3)}{3G_M J_\rho \cdot m}, \quad (3)$$

где

$$m = \frac{1}{2\pi i} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

– для пружин с постоянным шагом:

$$\lambda = \frac{P(r_2^4 - r_1^4)}{4G_M J_\rho \cdot t}, \quad (4)$$

где

$$t = \frac{r_2 - r_1}{2\pi i}.$$

В этих формулах: i – количество витков, r_1 , r_2 – наименьший и наибольший радиусы пружины, $G_M \cdot J_\rho$ – жёсткость прутка на кручение в мартенситном состоянии.

Для нахождения перемещений пружины в неупругой области её деформирования необходимо определить функцию $\theta(M)$, входящую в формулу (2). Для рассматриваемого случая функция, обратная $\theta(M)$, т.е. $M(\theta)$ приведена в работе [2], а методика обращения этой функции в зависимость $\theta(M)$ изложена в нашей работе [3]. Введём безразмерные величины $\bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_{\text{фт}}}$ и $\bar{M} = \frac{M}{M_{\text{фт}}}$.

Замечая, что функция $\bar{\theta}(\bar{M})$ при больших значениях $\bar{\theta}$ обладает асимптотой, она разбита на два участка. Первый участок, где $(1 \leq \bar{\theta} \leq \bar{\theta}_*)$, аппроксимирован параболой, а второй участок при $\bar{\theta} > \bar{\theta}_*$ заменён прямой, параллельной асимптоте. Таким образом, имеем:

$$\bar{\theta}(\bar{M}) = a_0 + a_1 \bar{M} + a_2 \bar{M}^2, \quad (1 \leq \bar{M} \leq \bar{M}(\bar{\theta}_*)) \quad (5)$$

$$\bar{\theta}(\bar{M}) = b_0 + b_1 \bar{M}. \quad (\bar{M} > \bar{M}(\bar{\theta}_*)) \quad (6)$$

Заметим, что случай $\bar{\theta} < 1$ соответствует упругой деформации пружины. Здесь величина θ_* выбрана таким образом, чтобы разность между функцией $M(\theta)$ и её асимптотой

не превышала 5%. Коэффициенты a_i , а также величина θ_* , входящие в формулы (5) и (6), зависят от параметра упрочнения материала n и определяются из условия наилучшего совпадения аппроксимирующей и действительной кривой. Значения коэффициентов a_i и величина θ_* рассчитаны для различных n и приведены в таблице 1.

Таблица 1

n	θ_*	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
0,01	1,731	-0,262	1,774	-0,513	14,060	-25,412	12,352
0,05	1,700	-0,269	1,775	-0,505	10,130	-18,116	8,986
0,15	1,628	-0,315	1,817	-0,503	4,973	-8,535	4,563
0,25	1,557	-0,353	1,849	-0,496	2,842	-4,537	2,696
0,30	1,516	-0,372	1,866	-0,494	2,219	-3,358	2,139

Рассмотрим разные этапы работы пружины.

Упругая работа. В этом случае растягивающая пружину сила должна быть меньше чем $P_{\text{фт}}^M$. Очевидно,

$$P_{\text{фт}}^M = \frac{M_{\text{фт}}}{r_r}. \quad (7)$$

При силе $P > P_{\text{фт}}^M$ в пружине образуются две зоны: упругая неупругая. Граница раздела двух зон определяется радиусом:

$$r_{\text{фт}} = \frac{M_{\text{фт}}}{P}. \quad (8)$$

При силе $P > P_*$ образуется еще одна зона. Очевидно, что значение силы при этом равно:

$$P_* = \frac{M_*}{r_2}. \quad (9)$$

Здесь величина момента M_* определяется из зависимости $M(\theta)$ при $\theta = \theta_*$, т. е. $M_* = M(\theta_*)$.

При нагрузке $P_{**} = M_{\text{фт}}/r_1$ чисто упругая зона исчезает, а при нагрузке $P > P_{***} = M_*/r_1$

функция $\theta(M)$ определяется только выражением (6).

Интегрируя уравнение (2) с использованием зависимостей $\theta(M)$, получены безразмерные формулы $\bar{P} \sim \bar{\lambda}$ для различных этапов нагружения пружины, где $\bar{P} = P/P_{\text{фт}}^M$; $\bar{\lambda} = \lambda/\lambda_{\text{фт}}^M$, здесь

$$\lambda_{\text{фт}}^M \text{ равно значению } \lambda \text{ при силе } P = P_{\text{фт}}^M, \eta = r_1/r_2, \bar{P}_* = P_*/P_{\text{фт}}^M, \bar{P}_{**} = P_{**}/P_{\text{фт}}^M, \bar{P}_{***} = P_{***}/P_{\text{фт}}^M.$$

Безразмерные графики $\bar{P} \sim \bar{\lambda}$ в зависимости от параметра упрочнения n построены на рис. 1,а. при $\eta = 0,5$. Эти графики являются характеристиками конической пружины за пределом упругих деформаций.

В работе [4] приводятся размерные графики $P - \lambda$ для конкретной конической пружины, изготовленной из сплава $ТН - 20$. Она имеет следующие параметры: $i = 6$, $r_1 = 14 \cdot 10^{-3}$ м, $r_2 = 17,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\eta = 0,8$, $P_{\text{фт}} = 4,3$ Н, $\lambda_{\text{фт}} = 65 \cdot 10^{-3}$ м. Если привести эти графики в безразмерный вид, они с точностью до 4% совпадут с результатами расчётов, выполненных по вышеприведённым формулам в пределах рассматриваемых нами перемещений пружин, для параметра упрочнения $n = 0,23$. Эти графики показаны на рис. 1,б.

Таким образом, для сплава ТН-20 можно принять параметр упрочнения $n = 0,23$.

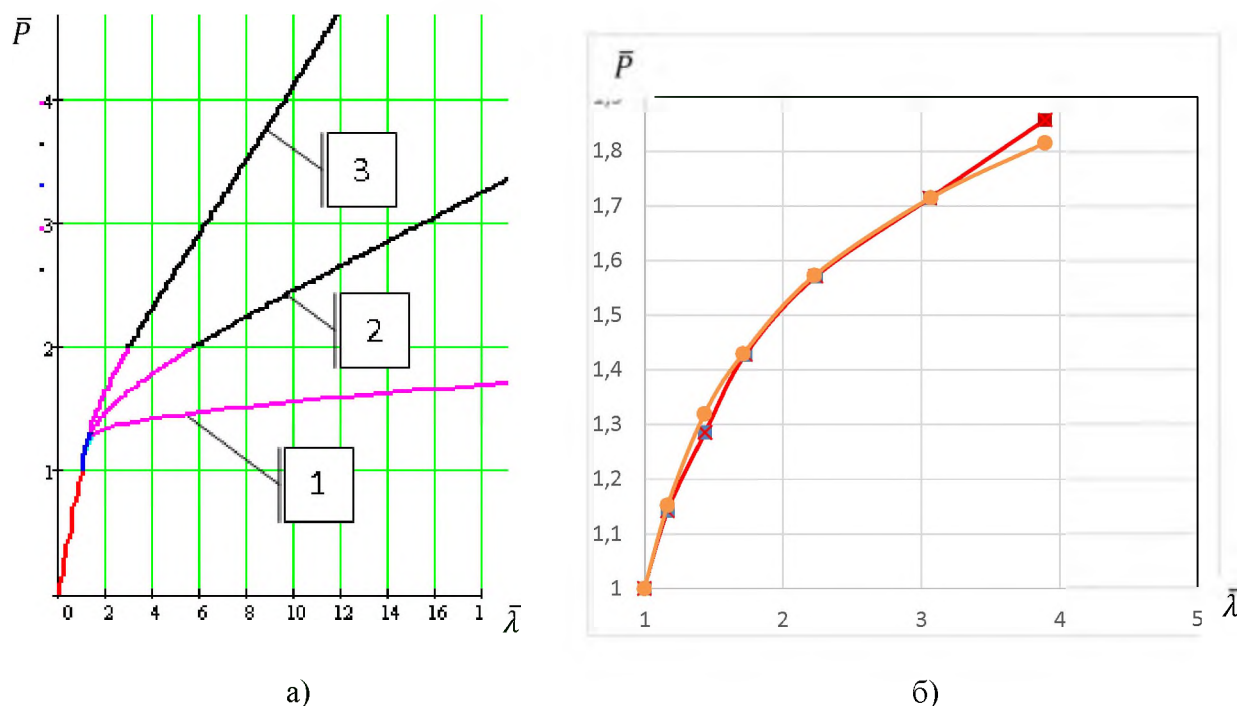


Рис. 1. Характеристические кривые конических пружин в неупругой области их деформирования: а) расчеты выполнены для $\eta = 0,5$, кривые 1,2,3 соответствует параметрам упрочнения n , соответственно, равным 0,01; 0,1; 0,3; б) расчеты выполнены для $\eta = 0,8$, кривые: ● – теория ($n = 0,23$); ■ – эксперимент.

Далее рассмотрим процесс разгрузки и определения реактивных усилий при стесненном формовосстановлении. Как показывают эксперименты [5], появление неупругих фазовых деформаций при нагреве приводит к упрочнению пружины. В результате этого при повторном нагружении пружина ведёт себя практически упруго до величины силы разгрузки $P_{\text{раз}}$. На основании этого при определении величины реактивной силы R , растягивающей пружину после её разгрузки, будем исходить из зависимостей, полученных для данной пружины при её упругой работе. Принимая это положение, а также пренебрегая чисто температурными слагаемыми, нами в работе [4] получено следующее безразмерное выражение:

$$\bar{R}(T) = \frac{\xi \bar{\lambda}_{\text{ост}} C(T) (T - A_H)}{C_M (A_K - A_H)}, \quad (10)$$

где ξ – параметр, характеризующий полноту формовосстановления ($\xi \leq 1$);

$\bar{\lambda}_{\text{ост}} = \lambda_{\text{ост}}(P_{\text{раз}}) / \lambda_{\text{фт}}^M$, A_H, A_K – температуры начала и конца аустенитного превращения;

отношение жёсткостей пружины $\frac{C(T)}{C_M} = \frac{G(T)}{G_M}$, где $G(T)$ – значение модуля сдвига материала при температуре нагрева T ; $\bar{R}(T) = R(T) / P_{\text{фт}}^M$. Из последней формулы после прохождения

полного интервала температур фазового превращения получаем величину максимальной реактивной силы:

$$\bar{R}(T)_{\text{max}} = \xi \bar{\lambda}_{\text{ост}} \frac{G_A}{G_M}, \quad (11)$$

где G_A – модуль сдвига материала в аустенитном состоянии. На основании формулы (10), для конкретной пружины, рассмотренной в работе [4], построены графики зависимости реактивного усилия R от температуры T для различных величин $\bar{\lambda}_{ост}$ и ξ , показанные на рис. 2. При этом для этой пружины приняты следующие данные: $G_M = 1,52 \cdot 10^{10}$ Па; $G_A = 2,28 \cdot 10^{10}$ Па; $A_H = 25^\circ\text{C}$; $A_K = 65^\circ\text{C}$.

Из экспериментов получено, что при значении $\bar{\lambda}_{ост} = 4$ максимальное значение реактивной силы равно 26 Н. Следовательно, безразмерная максимальная величина реактивной силы равна:

$$\bar{R}_{max} = \frac{R_{max}}{P_{фт}^M} = \frac{26}{4,3} = 6.$$

Этот результат подтверждается поведением линии в) на рис. 2. Аналогичный результат получается и из формулы (11) при значении параметра формовосстановления $\xi = 1$.

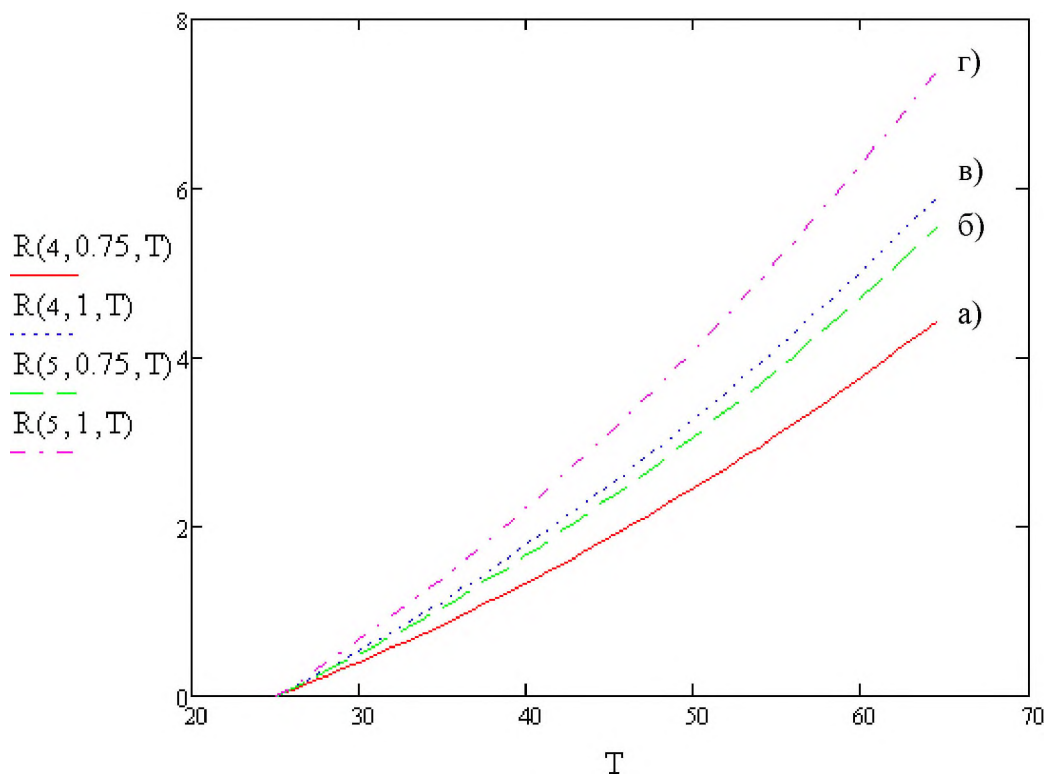


Рис.2. Для линий а), б) $\bar{\lambda}_{ост} = 4$; при этом для линии а) $\xi = 0,75$; для линии в) $\xi = 1$. Для линий б) и г) $\bar{\lambda}_{ост} = 5$; при этом для линии б) $\xi = 0,75$; для линии г) $\xi = 1$.

Таким образом, приходим к выводу, что приведённые в работе аналитические результаты адекватно отражают поведение конической пружины с эффектом памяти формы при термосиловом воздействии.

Список литературы

- 1) Пономарев С.Д. Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов, Машиностроение, М.: 1980. -325с.
- 2) Абдрахманов С.А. Деформация материалов с памятью формы при термосиловом воздействии. //Бишкек «Илим», 1991, -116с.
- 3) Абдрахманов С.А., Асылбек Абдыжапар. Кручение вала в неупругой области деформирования. Известия КГТУ им. Раззакова, №30. Бишкек, 2013 – с. 86-88.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 41/2017

4) Абдрахманов С.А., Кожошов Т.Т., Сатыбалдиев Т.А. Экспериментальное определение модуля упругости сплава ТН-20 с использованием конической пружины. Известия КГТУ им. И. Раззакова, №1 (34), 2015, с. 248-252

5) Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л., Изд. ЛГУ.1987, 216 с.