

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА и КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА и АРХИТЕКТУРЫ им. Н.ИСАНОВА

Диссертационный совет Д 01.12.005

На правах рукописи

УДК 539.4

КОЖОШОВ ТАЛАНТБЕК ТЫНЫМСЕЙТОВИЧ

**РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИТЫХ ПРУЖИН С ЭФФЕК-
ТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

Специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек 2012

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **С.А. Абдрахманов**(Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Я.И. Рудаев**(Кыргызско-Российский славянский университет им. Б. Н. Ельцина); кандидат технических наук, доцент **Ж.Ш. Кожобаев**(Кыргызско-Турецкий университет «Манас»).

Ведущая организация: Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265-а.

Защита состоится « 8 » июня 2012 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного Совета Д 01.12.005 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук в Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова.

Автореферат разослан «4» мая 2012 г.

Ученый секретарь

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. что некоторые сплавы обладают широким спектром нетрадиционных свойств, например, таких как эффект памяти формы, обратимый эффект памяти формы, генерация реактивных усилий и др., присущих обычным конструкционным материалам. В настоящее время с использованием таких материалов создаются новые устройства для различных отраслей экономики и, в связи с этим, важное значение имеют вопросы расчета напряжений и деформаций в элементах таких конструкций и устройств.

В диссертации рассматриваются работавитых пружин круглого поперечного сечения из материала с памятью формы при термосиловом воздействии. Как известно, эффект памяти формы и генерация реактивных усилий проявляются при наличии неупругих деформаций. В связи с этим, важными этапами при проектировании конструкций, работающих за пределами упругости, являются: определение предельной нагрузки, после которой возникают неупругие деформации (мартенситной природы); определение величин неупругих деформаций; вопросы разгрузки и изучение остаточных деформаций; исследование реактивных усилий, возникающих в условиях воспрепятствования формовосстановлению образца.

В данной работе вышеперечисленные проблемы изучаются на примере цилиндрических пружин, претерпевающих существенные осевые перемещения при растяжении, сжатии и кручении.

Актуальность данного диссертационного исследования обусловлена: необходимостью изучения поля напряжений и деформаций в поперечном сечении прутка пружин, обладающих эффектом памяти формы; исследования геометрических параметров при активном и пассивном нагружении; развитие реактивных усилий, возникающих в стесненных условиях при ее нагреве. Реализация на практике данного исследования даст возможность конструирования новых приборов и устройств с использованием пружин, обладающих нетрадиционными эффектами.

Цель работы: Определение неупругих деформаций, возникающих при растяжении-сжатии или при кручении пружин; разработка методов расчета пружин за пределом упругости; определение изменения геометрических параметров в процессе деформирования при активном и пассивном нагружении. Разработка методов расчета реактивных усилий при термосиловом воздействии, возникающих в условиях воспрепятствования их формовосстановления. В соответствии с постав-

ленной целью, объектом исследования является работа витых пружин круглого поперечного сечения из материала с памятью формы при термосиловом воздействии.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

- Найти определяющие соотношения для расчета предельной нагрузки и определить ее величину при растяжении-сжатии или кручении пружин;
- определить остаточную кривизну, диаметр, угол подъема, а также перемещения конца пружины (угловые и линейные), в зависимости от значений максимальных нагрузок (крутящих моментов, растягивающих усилий) перед разгрузкой и после полной разгрузки;
- найти методику расчета реактивных усилий, возникающих в процессе нагрева пружины, в условиях воспрепятствования ее формовосстановления;
- экспериментально изучить деформирование пружин за пределом упругости из материалов с эффектом памяти формы;
- экспериментально исследовать реактивные нагрузки (крутящий момент, осевые усилия) пружин при термосиловом воздействии, в условиях воспрепятствования ее свободного формовосстановления.

Научная новизна и теоретическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- получены формулы для расчета пружин за пределом упругости, а также определены предельные нагрузки (осевые усилия и крутящий момент);
- получены формулы для расчета остаточных параметров при пассивном нагружении (разгрузка) для цилиндрических витых пружин;
- определены реактивные усилия, возникающие при нагреве пружин, изготовленных из материала с эффектом памяти формы, в условиях воспрепятствования ее формовосстановления;
- построены алгоритмы расчета, описывающие активное упруго-неупругое деформирование, пассивное нагружение пружины, а также алгоритмы расчета для определения текущих и остаточных параметров, предельных нагрузок, реактивных усилий, возникающих при термосиловом воздействии на пружину.
- Эти алгоритмы реализованы в программах, составленных на языках MathCAD и Excel 2010:

Практическая значимость полученных результатов. Рассмотренный метод расчета предельной нагрузки при больших перемещениях, а также определение

остаточных параметров после разгрузки, особенно необходим при изучении величин реактивных усилий, возникающих в пружинах с памятью формы при формовосстановлении.

Разработанный аналитический метод, а также полученные зависимости определения неупругих и остаточных деформаций, а также расчета реактивных усилий, возникающих в процессе формовосстановления, могут быть использованы широким кругом исследователей и конструкторов, работающих с большими перемещениями пружин (угловых и линейных).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Предложено аналитическое решение расчета деформирования пружин за пределом упругости под действием нагрузок (усилий, моментов), превышающих их предельные значения $P_{\text{фн}}$, $M_{\text{фн}}$;
- Предложен расчет остаточных параметров пружин, при ее пассивном нагружении (разгрузка);
- Предложен расчет реактивных усилий, генерируемых в предварительно деформированных пружинах из материала с памятью формы при термосиловом воздействии на нее, в условиях воспрепятствования ее формовосстановлению;

Личный вклад:

- выдвижение новой методики расчета пружин с учетом неупругих деформаций. Этот метод позволяет определить аналитически решение напряженно деформированного состояния пружин за пределом упругости под действием нагрузок, превышающих их предельные значения $P_{\text{фн}}$, $M_{\text{фн}}$;
- выведены уравнения для расчета остаточных параметров пружин, при ее пассивном нагружении (разгрузка);
- выведены уравнения для расчета реактивных усилий, генерируемых в предварительно деформированных пружинах из материала с памятью формы при термосиловом воздействии на нее, в условиях воспрепятствования ее формовосстановлению;
- составлены компьютерные программы в системе MathCad и проведение вычисления на ЭВМ.

Исследованные в диссертации теоретические вопросы, и приведенные экспериментальные результаты, получены автором при непосредственном участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и узловые результаты научного исследования докладывались и обсуждались на еженедельных научных семинарах, проходящих в лаборатории «Память металлов» Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова, а также на:

Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 100-летию первого ректора ФПИ-КГТУ профессора Сухамлинова Г.А. «Инновации в образовании, науке и технике» (г. Бишкек 2006, КГТУ им. И. Раззакова); Международной научно-технической конференции «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития», посвященной 55-летию Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова (г. Бишкек, КГТУ, 16-17 сентября 2009 г.); Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной 100-летию со дня рождения академика, Героя социалистического труда Халила Ахмедовича Рахматулина (г. Бишкек, НАН КР, 28-29 мая 2009 г.); Международной научно – технической конференции, посвященной 50 – летнему юбилею кафедры «Технология машиностроения» (г. Бишкек, КГТУ им. И.Раззакова, 28-30 мая 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Прикладная математика и механика: проблемы и перспективы», посвященной дню науки Кыргызской Республики (г. Бишкек, КГТУ им. И.Раззакова, 18-19 ноября 2010 г.); Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения» (г. Алматы, 17-19 июня 2009 г.); 52-й научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 100-летию И. Раззакова «Студенческая наука: взгляд молодых» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (г. Бишкек, КГТУ, 28 апреля 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании: состояние, проблемы и перспективы» КГУСТА им. Н. Исанова 1-2 июля 2011 г.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, полученными в лаборатории «Память металлов» Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова, а также с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в других источниках.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 научных статей в следующих изданиях: Известиях Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова; Известиях Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры; Материалах Международной научно-технической конференции «Инновации в образовании, науке и технике», посвященной 100-летию профессора Сухамлинова Г.А. (Бишкек 2006 г.); Материалах III международной конференции «Актуальные проблемы

механики и машиностроения» (г. Алматы, 2009 г.);Всероссийском научном журнале“Механика Композиционных Материалов и Конструкций”(г.Москва 2010);Известиях вузов (г. Бишкек 2010 г.);Республиканском научно-техническом журнале“Наука и новые технологии”, (г.Бишкек 2010);Вестнике инженерной академии им. Эйнштейна (г. Бишкек, 2009 г.);Материалах 52-й научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, «Студенческая наука: взгляд молодых» (г. Бишкек, 2010 г.);в трудах “Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной100-летию академика, Героя социалистического труда Халила АхмедовичаРахматулина” (г. Бишкек, 2009г.);в трудах “Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященнойпамяти академика, Героя социалистического труда Халила АхмедовичаРахматулина” (г. Бишкек, 2011 г.).

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит 135страниц и состоит из введения, трехглав и приложения. Основной текст изложен на 88страницах, содержит 50рисунков. Список использованной литературы состоит из 104наименований.

Краткое содержание работы.

В введении раскрывается актуальность работы, ставятся цель и задачи исследования.

В первой главе приведен обзор основных вопросов и проблем термоупругих мартенситных превращений, характеристических температур превращений, явления эффекта памяти формы в металлах и генерации реактивных напряжений, а также рассмотрены теоретические основы расчета винтовых цилиндрических пружин. Подробно рассмотрены и получены: основные геометрические соотношения, проведен анализ внутренних силовых факторов в поперечных сечениях витков цилиндрической пружины; рассмотрены малые упругие перемещения винтовых цилиндрических пружин; пренебрегая изменениями α и D , в случае малых перемещений в процессе деформирования пружины, рассмотрена линейная теория расчета пружин с разными частными случаями закрепления концов; в случае больших осевых перемещений рассмотрена нелинейная теория с разными частными случаями закрепления концов; произведен теоретический расчет цилиндрических пружин растяжения-сжатия и графически определена предельная нагрузка, после которой начинаются появляться неупругие деформации.

Во второй главе приводится методика расчета пружин (растяжения, сжатия и кручения), работающих за пределом упругости. Рассматриваемая для материала пружины диаграмма зависимости между напряжениями τ (σ) и деформациями μ

(ε), аппроксимируется двухзвенной ломаной линией, как в мартенситном, так и в аустенитном состояниях материала.

Пусть при некоторой нагрузке $P_{\phi T}^r$ максимальные касательные напряжения достигнут величины предела фазовой текучести материала $\tau_{\phi T}$, тогда при нагрузке $P > P_{\phi T}^r$ пружина будет работать в неупругой области деформирования.

Будем считать, что материал в неупругой области деформируется с линейным упрочнением, причем модуль упрочнения равен $n_\tau G$ ($0 < n_\tau < 1$).

В этом случае изменение кручения витка пружины определяется по формуле:

$$\Delta\omega = \frac{M_{kp}}{GJ_\rho K_1(\rho)} = \frac{M_{kp}}{C_1}, \quad (1)$$

где $C_1 = GJ_\rho K_1(\rho)$, $K_1(\rho)$ - коэффициент уменьшения жёсткости на кручение; $\rho = \frac{2r_{\phi T}}{d}$ - безразмерный параметр, характеризующий глубину зоны неупругих деформаций в сечении прутка; $r_{\phi T}$ - радиус прутка, где касательные напряжения равны по величине $\tau_{\phi T}$. Коэффициент $K_1(\rho)$ определяется следующим выражением

$$K_1(\rho) = n_\tau + (1 - n_\tau) \left(\frac{4}{3} \rho - \frac{1}{3} \rho^4 \right). \quad (2)$$

Причем, значение коэффициента $K_1(\rho) = 1$ соответствует случаю перехода работы пружины из упругого состояния в неупругое. При этом из формулы (1) получаем:

$$\Delta\omega_{\phi T} = \frac{M_{kp}^{\phi T}}{GJ_\rho}. \quad (3)$$

Здесь $\Delta\omega_{\phi T}$, $M_{kp}^{\phi T}$ - значения изменения кручения и крутящего момента в момент перехода материала из упругого в неупругое состояние. С другой стороны

$$\tau_{\phi T} = G\Delta\omega_{\phi T} \frac{d}{2}.$$

Кроме этого на границе упругой и неупругой зоны имеем

$$\tau_{\phi T} = G\Delta\omega r_{\phi T}.$$

Приравнявая последние равенства, получаем

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\phi T}} = \frac{1}{\rho}. \quad (4)$$

Формулы (1) и (4) дают

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\phi T}} = \frac{M_{kp}}{M_{kp}^{\phi T}} \frac{1}{K_1(\rho)}. \quad (5)$$

Сравнивая равенства (4) и (5), запишем

$$\frac{M_{kp}}{M_{kp}^{\phi T}} = \frac{K_1(\rho)}{\rho} = m(\rho). \quad (6)$$

Очевидно, что в последней формуле

$$M_{KP}^{\phi T} = \tau_{\phi T} \frac{\pi d^3}{16}. \quad (7)$$

Определим значение параметра $\alpha = \alpha_{\phi T}^{\tau}$, при котором заканчивается упругая работа пружины. Для этого приравняем величины крутящего момента значению $M_{\phi T}$.

$$P(\alpha)D(\alpha)\cos\alpha = 2M_{KP}^{\phi T}, \quad (8)$$

где значения P и D определяется следующими выражениями:

$$P = \frac{4B}{D_0^2} \sin(\alpha - \alpha_0) \frac{\cos^2 \alpha_0}{\cos \alpha} \frac{\frac{B}{C} \cos \alpha \cos \alpha_0 + \sin \alpha \sin \alpha_0}{\left(\frac{B}{C} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha\right)^2}, \quad (9)$$

$$D = D_0 \frac{\frac{2B}{C} \cos^3 \alpha + \sin \alpha \sin 2\alpha}{\frac{2B}{C} \cos \alpha \cos^2 \alpha_0 + \sin \alpha \sin 2\alpha_0}. \quad (10)$$

Корень уравнения (8) $\alpha = \alpha_{\phi T}^{\tau}$, определяет граничное значение угла подъёма пружины, после которого она переходит в неупругую область деформирования.

Установим связь между параметрами α и ρ при неупругой работе пружины. В этом случае нагрузка P и диаметр D определяются формулами (9) и (10), где жёсткость на кручение C заменяется на величину C_1 , т.е.

$$P(\rho, \alpha) = \frac{4B}{D_0^2} \sin(\alpha - \alpha_0) \frac{\cos^2 \alpha_0}{\cos \alpha} \frac{\frac{B}{C_1} \cos \alpha \cos \alpha_0 + \sin \alpha \sin \alpha_0}{\left(\frac{B}{C_1} \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha\right)^2},$$

$$(11) D(\rho, \alpha) = D_0 \frac{\frac{2B}{C_1} \cos^3 \alpha + \sin \alpha \sin 2\alpha}{\frac{2B}{C_1} \cos \alpha \cos^2 \alpha_0 + \sin \alpha \sin 2\alpha_0}. \quad (12)$$

Кроме этого должно выполняться условие (6), следовательно, с учетом формулы (7) получаем следующее уравнение:

$$P(\alpha, \rho)D(\alpha, \rho)\cos\alpha = 2m(\rho)\tau_{\phi T} \frac{\pi d^3}{16}. \quad (13)$$

Определив корни этого уравнения при заданном ρ , получим зависимость

$$\alpha = \alpha(\rho).$$

Таким образом, для определения характеристики пружины при её деформировании в неупругой области, можно предложить следующий алгоритм вычислений. Задавись величиной ρ , вычисляем $K_1(\rho)$ по формуле (2), затем по

формуле (6) определяем величину коэффициента $m(\rho)$. После этого, решая уравнение (13), определяется величина угла подъема пружины α , соответствующего данному ρ . Далее по формулам (11) и (12) определяются значения $P(\alpha, \rho)$ и $D(\alpha, \rho)$. После этих вычислений находим линейные и угловые перемещения пружины по формулам:

$$\lambda = \frac{\pi D_0 i_0}{\cos \alpha_0} (\sin \alpha - \sin \alpha_0), \quad (14)$$

$$\theta = \frac{\pi D_0 i_0}{\cos \alpha_0} \left(\frac{\cos \alpha}{D} - \frac{\cos \alpha_0}{D_0} \right). \quad (15)$$

Разгрузка пружины растяжения

Пусть разгрузка происходит при достижении безразмерного параметра ρ , характеризующего глубину зоны неупругих деформаций, величины ρ_p . При этом угол подъема пружины $\alpha = \alpha_p$. Характеристики пружины, соответствующие данному параметру обозначим через P_p, D_p, λ_p . Отметим, что α_p при заданном ρ_p находится из решения уравнения (13). Усилие P_p и диаметр пружины D_p определяются по формулам (11) и (12):

$$P_p = P(\rho_p, \alpha_p) \quad \text{и} \quad D_p = D(\rho_p, \alpha_p).$$

По формуле (14), находим λ_p . Приравнявая $P = P_p$ и используя формулы (8) и (9), находим значение угла α_y , соответствующее упругому деформированию пружины. Таким образом, получаем уравнение:

$$P_p = P(\alpha_y). \quad (16)$$

Подставляя значение α_y в формулу (14), получим значение $\lambda_y = \lambda(\alpha_y)$. Отнимая от полного удлинения λ_p перед разгрузкой ее упругую составляющую λ_y , получим величину остаточного удлинения:

$$\lambda_{ост}(\rho_p) = \frac{\pi D_0 i_0}{\cos \alpha_0} (\sin \alpha_p - \sin \alpha_y). \quad (17)$$

Таким образом, получена формула для определения остаточных перемещений $\lambda_{ост}$, зависящих от параметра неупругих деформаций ρ_p . Здесь α_p находится из решения уравнения (13), а α_y из решения уравнения (16).

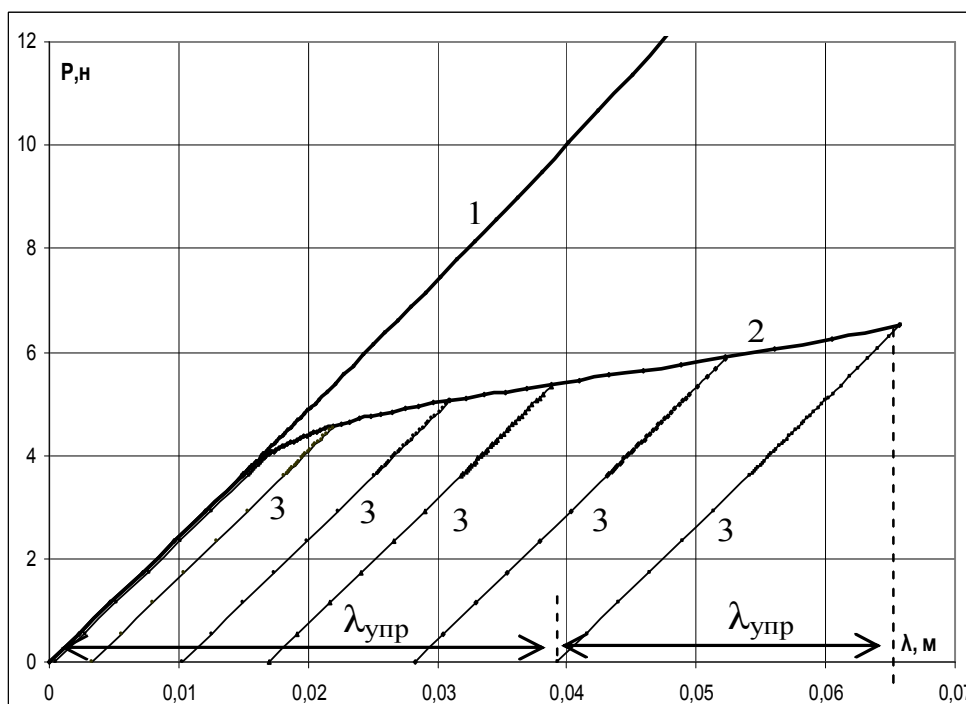
По полученным результатам построен график (рис. 1) деформирования пружин за пределом упругости, а так же определение изменения геометрических параметров в процессе деформирования при активном и пассивном нагружении.

В данном случае для вычисления характеристик пружины использовался следующий алгоритм:

$$\rho_p \Rightarrow K(\rho_p) \Rightarrow m(\rho_p) \Rightarrow \alpha_p \Rightarrow (P_p \text{ и } D_p) \Rightarrow \alpha_y \Rightarrow \lambda_{ост}(\rho_p) \Rightarrow P_p \sim \lambda_{ост}.$$

Пружины кручения

Рассмотрим пружину кручения, на торце которого приложен только крутящий момент (случай $P = 0$). В этом случае параметры пружины связаны с крутящим моментом (m) следующими формулами:



На рис. 1. кривые: 1- упругий случай, 2- неупругий случай, 3- разгрузки.

$$\left\{ \begin{array}{l} 2B \left(\frac{\cos^2 \alpha}{D} - \frac{\cos^2 \alpha_0}{D_0} \right) = m \cdot \cos \alpha, \\ C \left(\frac{\sin 2\alpha_0}{D} - \frac{\sin 2\alpha_0}{D_0} \right) = m \cdot \sin \alpha. \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2B \left(\frac{\cos^2 \alpha}{D} - \frac{\cos^2 \alpha_0}{D_0} \right) = m \cdot \cos \alpha, \\ C \left(\frac{\sin 2\alpha_0}{D} - \frac{\sin 2\alpha_0}{D_0} \right) = m \cdot \sin \alpha. \end{array} \right. \quad (19)$$

Из (18) и (19), исключив m , найдем связь между α и D :

$$D = D_0 \frac{(B - C) \sin 2\alpha}{(2B \tan \alpha \cos^2 \alpha_0 - C \sin 2\alpha_0)}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (18), получаем следующую связь $m(\alpha)$:

$$m = \frac{2C}{D_0 \cdot \cos \alpha} \frac{\left(\cos^2 \alpha_0 - \frac{\sin 2\alpha_0}{\sin 2\alpha} \cdot \cos^2 \alpha \right)}{\left(1 - \frac{C}{B} \right)}. \quad (21)$$

Определение изгибающего момента, соответствующего началу фазовой деформации

Пусть при некоторой нагрузке m максимальные нормальные напряжения в поперечном сечении прутка достигнут величины предела фазовой текучести материала $\sigma_{\phi T}$, а значение изгибающего момента соответствующее этому случаю обозначим $M_{\phi T}$.

Определим значение параметра $\alpha = \alpha_{\phi T}$, при котором заканчивается чисто упругая работа пружины. Для этого приравняем величины изгибающего и фазового моментов $M_{из} = M_{\phi T}$. Получим:

$$m_{\phi T} \cdot \frac{\cos \alpha}{W_{из}} - \sigma_{\phi T} = 0. \quad (22)$$

Корень уравнения (22) $\alpha = \alpha_{\phi T}$ определяет граничное значение угла подъема пружины, после которого начинают появляться неупругие деформации.

Таким образом, окончательно получили формулу для определения момента, соответствующего началу фазовой текучести:

$$m_{\phi T} = \frac{2C}{D_o \cdot \cos \alpha_{\phi T}} \frac{\left(\cos^2 \alpha_o - \frac{\sin 2\alpha_o}{\sin 2\alpha_{\phi T}} \cdot \cos^2 \alpha_{\phi T} \right)}{\left(1 - \frac{C}{B} \right)}. \quad (23)$$

Работа пружины кручения за пределом упругости

Рассмотрим случай, когда значение крутящего момента больше чем M_{ϕ} , т.е. $M_{из} \geq M_{\phi}$. В поперечном сечении прутка пружины образуются зоны, где напряжения по величине превосходят $\sigma_{\phi н}$. Следовательно, в поперечном сечении прутка, кроме упругих появятся и фазовые деформации. Граничную ординату, разделяющую чисто упругую область от неупругой, обозначим через y_{ϕ} . Очевидно, напряжения в этих областях будут равны:

$$\sigma = \frac{M}{JK_2(\xi)} \cdot y \quad (0 \leq y \leq y_{\phi}),$$

$$\sigma = \frac{M}{JK_2(\xi)} [ny + (1-n)y_{\phi}] \quad (y_{\phi} \leq y \leq y_{\max}).$$

На границе фазовых деформаций должно быть:

$$\sigma_{\phi} = E \frac{y_m}{\mathfrak{R}_{\phi}} \quad \text{и} \quad \sigma_{\phi} = E \frac{y_{\phi}}{\mathfrak{R}}.$$

Приравнивая эти уравнения, получим:

$$\frac{\mathfrak{R}_\phi}{\mathfrak{R}} = \frac{y_\phi}{y_{\max}} = \xi.$$

С другой стороны на границе упругой и неупругой области радиусы кривизны равны

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_\phi} = \frac{M_{\phi n}}{EJK_2(\xi)} \quad \text{и} \quad \frac{1}{\mathfrak{R}} = \frac{M_{\phi n}}{EJ},$$

отсюда

$$M_{из} = M_{\phi n} \frac{K_2(\xi)}{\xi}. \quad (24)$$

Здесь $M_{\phi n}$ - момент, соответствующий начала фазовой текучести:

$$M_{\phi n} = \sigma_{\phi n} \cdot W_X.$$

Изгибающий момент связан с внешним крутящим моментом m следующей зависимостью

$$M_{из} = m \cdot \cos \alpha. \quad (25)$$

Из уравнения (24) и (25) имеем:

$$m \cdot \cos \alpha = M_{\phi n} \cdot \frac{K_2(\xi)}{\xi}, \quad (26)$$

где внешний крутящий момент m определяется по формуле (21), только вместо жесткости B необходимо подставить $B_1 = B \cdot K_2(\xi)$. Относительный угол поворота определится по формуле

$$\theta = \frac{\pi D_0 i_0}{\cos \alpha_0} \left(\frac{\cos \alpha}{D} - \frac{\cos \alpha_0}{D_0} \right).$$

Разгрузка пружин кручения

При разгрузке деформированной пружины кручения, нагруженной за пределом упругости максимальным крутящим моментом m_p , витки пружины начнут выпрямляться, волокна в растянутой части сечения сокращаются. При этом волокна, лежащие в неупругой области прутка пружины, вскоре достигают размеров, которые они имели в свободном состоянии, в то время как волокна упругой области продолжают сокращаться, что влечет за собой поджатие внешних волокон. Это происходит до тех пор, пока внутренние силы не придут в равновесие.

Если бы для всех частичек материала деформации были упругими, то при разгрузке они бы постепенно уменьшались, и в конце этого процесса были бы равными нулю, но при наличии частиц, претерпевших неупругое деформирование, процесс перегруппировки внутренних сил во время разгрузки протекает более сложно. Вследствие этого после разгрузки витки пружины остаются с остаточной кривизной. Используя теорему о разгрузке, получим остаточную кривизну в виде:

$$\chi_{ост} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ост}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_p} - \frac{1}{\mathfrak{R}_y} = \frac{M_p}{E_M J} \left(\frac{1}{K_2(\xi_p)} - 1 \right), \quad (27)$$

где \mathfrak{R}_p - значение радиуса кривизны в сечении в момент разгрузки; \mathfrak{R}_y - радиус кривизны в сечении в предположении упругости изгиба под заданным изгибающим моментом.

С другой стороны остаточная кривизна из геометрических соотношений параметров пружины после разгрузки будет равна

$$\chi_{ост} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ост}} = \frac{2 \cos^2 \alpha_{ост}}{D_{ост}}.$$

С учетом уравнения (27), получим значение остаточного угла подъема пружины:

$$\alpha_{ост} = \arccos \left(\sqrt{\frac{D_{ост} \cdot \chi_{ост}}{2}} \right).$$

Остаточный диаметр ($D_{ост}$) пружины после разгрузки определится по формуле:

$$D_{ост} = D_0 - D_p + D_y,$$

где D_0 - диаметр пружины до деформации, D_p - диаметр пружины, соответствующий моменту перед разгрузкой.

Остаточное угловое перемещение находится из уравнения:

$$\theta_{ост} = 2 \cdot L_0 \cdot \left(\frac{\cos \alpha_{ост}}{D_{ост}} - \frac{\cos \alpha_0}{D_0} \right). \quad (28)$$

Диаметры пружин D_p и D_y определяются следующими формулами:

$$\frac{D_y}{D_0} = \frac{(B - C) \cdot \sin 2\alpha_y}{2 \cdot B \cdot \operatorname{tg} \alpha_y \cdot \cos^2 \alpha_0 - C \cdot \sin 2\alpha_0}, \quad (29)$$

$$\frac{D_p}{D_0} = \frac{(B_1 - C) \cdot \sin 2\alpha_p}{2 \cdot B_y \cdot \operatorname{tg} \alpha_p \cdot \cos^2 \alpha_0 - C \cdot \sin 2\alpha_0}. \quad (30)$$

Значение α_y находим из условия $m_y = m_p$. Связывая действующие изгибающие моменты, получим:

$$m_y \cdot \cos \alpha_y = \frac{M_{из}^p}{\cos \alpha_p}. \quad (31)$$

Здесь

$$M_{из}^p = M_\phi \frac{K_2(\xi_p)}{\xi_p}, \quad (32)$$

где $\xi_p = \left(\frac{2 \cdot y_\phi}{d} \right)$ - значение безразмерного параметра ξ , характеризующее глубину зоны неупругих деформаций перед разгрузкой. Параметр $K_2(\xi_p)$ - характеризует падение жесткости сечения на изгиб за счет неупругих деформаций.

Подставляя m_y в формулу (31) получаем следующее уравнение:

$$\frac{2C \left(\cos^2 \alpha_o - \frac{\sin 2\alpha_o}{\sin 2\alpha_y} \cdot \cos^2 \alpha_y \right)}{D_o \left(1 - \frac{C}{B} \right)} = M_\phi \cdot \frac{K_2(\xi_p)}{\xi_p}. \quad (33)$$

При заданной глубине начала неупругой зоны ξ_p , решая уравнение (33), находим значение угла α_y . После этого, подставляя найденные значения $\alpha_y, D_y, D_{ост}$ и $\alpha_{ост}$, в уравнения (29), (30) и (28), находим остаточное угловое перемещение $\theta_{ост}$.

В **третьей главе** теоретически исследуются реактивные усилия, а так же реактивный момент, зависящие от остаточных параметров (удлинений, углов поворота) пружин, обладающих эффектом памяти формы. Экспериментально исследуются цилиндрические витые пружины растяжения-сжатия и кручения из сплава никелида титана, обладающего памятью формы. Приводится методика проведения эксперимента: в упругой зоне деформирования; за пределом упругости; при активном и пассивном нагружениях, а так же способы экспериментальных исследований пружин в условиях воспрепятствования процессу свободного формовосстановления при термосиловом воздействии. Сравниваются экспериментальные данные с теоретическими результатами расчета, как упругодеформированной, так и неупруго деформированной пружины.

Здесь при термосиловом воздействии на пружину предполагается, что:

а) остаточная неупругая (фазовая) деформация в процессе свободного 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 отличается от прямой незначительно. Следовательно, на данном этапе работы при изотермическом нагружении жёсткость пружины можно считать постоянной. Таким образом, до значения силы P_T можно записать:

$$P = C_0 \lambda, \quad (34)$$

где C_0 – жесткость пружины.

Если известна диаграмма $P \sim \lambda$, то жесткость можно определить из равенства:

$$C_0 = \frac{P_T}{\lambda_T}, \quad (35)$$

где P_T и λ_T определяются из формул (11) и (12), α_T является корнем следующего уравнения:

$$P(\alpha)D(\alpha)\cos\alpha = \tau_{\phi T} \frac{\pi d^3}{8}. \quad (36)$$

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

$$d[\lambda_1(R, C_0)] + d[\lambda_2(T)] = d[\lambda_{\text{пф}}]. \quad (37)$$

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

Считая, 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 (34) силу P на реактивную силу R , можем записать

$$d\lambda_1 = d\left(\frac{R}{C_0}\right). \quad (38)$$

Температурную осадку пружины можно определить по формуле

$$\lambda_2(T) = H_{\text{пф}} \xi(T) \Delta T, \quad (39)$$

где $H_{\text{пф}}$ - высота пружины 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,

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

где a_ξ и b_ξ - постоянные материала.

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

$$d\lambda_2(T) = H_{\text{пф}} \left[\frac{d\xi}{dT} (T - A_H) + \xi(T) \right] dT. \quad (40)$$

Осадку пружины за счет эффекта памяти формы будет равна:

$$d\lambda_{\text{пф}} = \lambda_{\text{осм}} \frac{dT}{A_K - A_H}. \quad (41)$$

Расписывая условие (37) с учетом формул (38), (40) и (41) получаем следующее уравнение для определения реактивной силы R , развиваемой пружиной при её нагреве:

$$d\left(\frac{R}{C_0}\right) = \lambda_{ocm} \frac{dT}{A_K - A_H} - H_{ПП} \left[\frac{d\xi}{dT}(T - A_H) + \xi(T) \right] dT.$$

Интегрируя последнее выражение и подставляя высоту $H_{ПП}$ пружины после разгрузки, которая равна $H_{ПП} = \lambda_{ocm} + l_0 \sin \alpha_0$, получим:

$$R(T) = C_0(T)(T - A_H) \left[\frac{\lambda_{ocm}}{A_K - A_H} - (\lambda_{ocm} + l_0 \sin \alpha_0) \xi(T) \right], \quad (42)$$

где λ_{ocm} - остаточное удлинение.

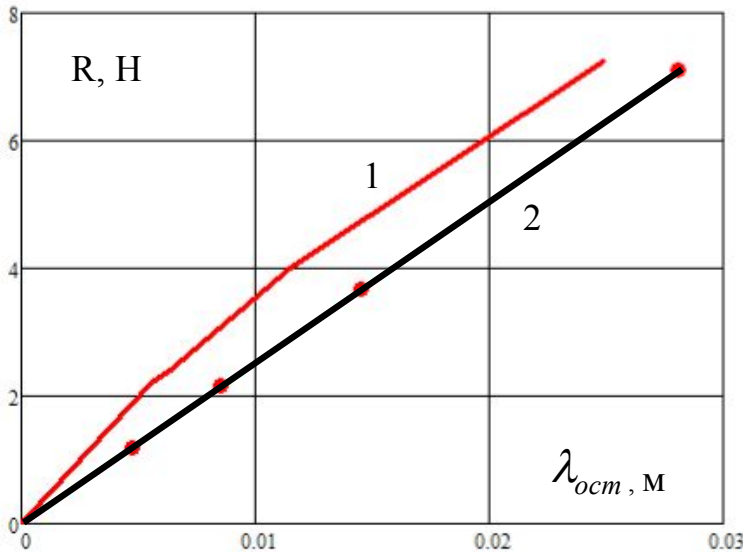


Рис. 2 Зависимость максимального реактивного усилия от остаточных удлинений: 1- теоретическая, 2- экспериментальная.

ми: $E_M = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и $E_A = 20,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $G_M = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ и $G_A = 3 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $\mu = 0,35$, $A_H = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $A_K = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Параметры пружины: $D_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_0 = 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $\alpha_0 = 1,82 \text{ градуса}$, $i_0 = 3$.

Оказалось что, максимальное расхождение теоретических результатов от экспериментальных не более 12%.

Формовосстановление пружин кручения

Рассмотренные ранее вопросы нагрузки – разгрузки пружины кручения в изотермических условиях являются подготовительными этапами для изучения основной поставленной задачи. Как показывает эксперимент, при свободном нагреве кривизна прутка меняется, и восстановление формы происходит в интервале температур обратного мартенситного превращения от A_n до A_c . При этом остаточные фазовые деформации исчезают пропорционально температуре при прохождении всего интервала температур превращения. Примем гипотезу, что в

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

$$R_{\max} = R(A_K) = C_0(A_K) \times \text{т.е.} \times [\lambda_{ocm} - (\lambda_{ocm} + H_0)] \times (A_K - A_H) \xi(A_K). \quad (43)$$

На рис.2 приведена зависимость максимального реактивного усилия от остаточных удлинений. При этом теоретические расчеты и эксперименты проводились для TiNi сплава со следующими физико-механическими характеристиками: $E_M = 8,5 \cdot 10^{10} \text{ Па}$

процессе нагрева глубина зоны структурных изменений, определяемая в момент разгрузки величиной $y_{фр}$, не изменяется. Таким образом, процесс исчезновения фазовой деформации при нагреве происходит подобно складывающемуся вееру. Если считать справедливым гипотезу плоских сечений, то можно принять, что закон исчезновения фазовой деформации линейно зависит от температуры.

Диаграмма деформирования рассматриваемой цилиндрической пружинки-ручички в координатах $m \sim \theta$ показывает, что до момента m_T данная кривая практически не отличается от прямой. Следовательно, на данном этапе работы при изотермическом нагружении жёсткость пружины можно считать постоянной. Таким образом, до значения момента m_T можно записать

$$m_T^M = K_0 \theta_T^M, \quad (44)$$

где K_0 – жёсткость пружины, равная

$$K_0 = \frac{m_T^M}{\theta_T^M}.$$

Учитывая малость линейного перемещения от температуры, а так же её влияние на θ , пренебрегая линейным температурным удлинением пружины, запишем условие совместности деформаций в виде:

$$d(\theta_T) = d(\theta_{пф}).$$

Здесь $d(\theta_T)$ – угол поворота торца пружины, вызванный реактивной силой; $d(\theta_{пф})$ – угол поворота пружины, обусловленный памятью формы.

$$d\left(\frac{m_R}{K_0}\right) = \theta_{осм} \frac{dT}{A_K - A_H}.$$

Интегрируя это выражение от T до A_K , получаем:

$$m_A(T) = K_0(T) \theta_{осм} \frac{T - A_H}{A_K - A_H}, \quad (45)$$

где $K_0(T) = a_\beta + b_\beta T$, и его параметры определяются формулами:

$$a_\beta = \frac{A_K \beta_M - A_H \beta_A}{A_K - A_H} \quad \text{и} \quad b_\beta = \frac{\beta_A - \beta_M}{A_K - A_H}.$$

Здесь β_M и β_A (ЕилиG)-характеристики материала при мартенсите и аустените.

Максимальное значение реактивного момента будет при температуре $T = A_K$, т.е.

$$m_{max}(A_K) = K_0(A_K) \cdot \theta_{ост} \quad (46)$$

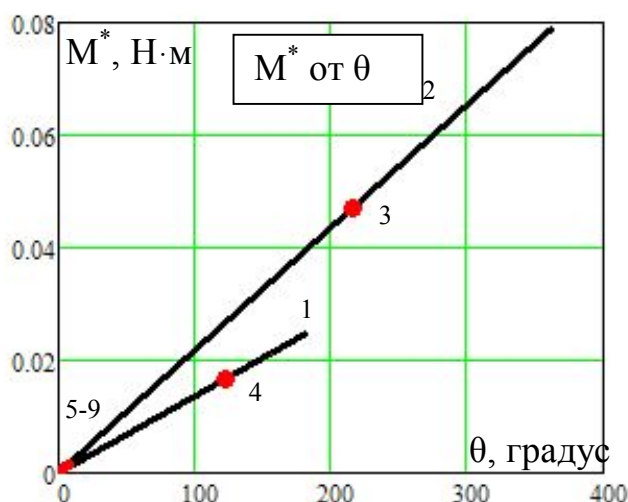


Рис. 3

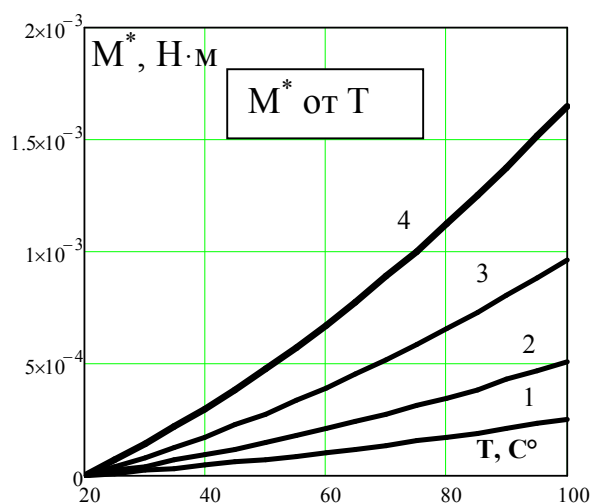


Рис. 4

На рис. 3 показана зависимость реактивного момента от температуры. Кривые 1- 4 отнесены к остаточным углам поворота ($\theta_{ост}$), которые равны соответственно 0,7; 1,99; 4,22; 7,55 градусам.

На рис. 4 приведены кривые деформации пружин в мартенситном (кривая 1) и в аустенитном (кривая 2) состояниях; точки 3 и 4 соответствуют пределу фазовой текучести при мартенсите и аустените; точки 5-9 соответствуют максимальным реактивным моментам при различных остаточных угловых перемещениях.

Заключение

Появление новых конструкций, в которых используются элементы из материалов с памятью формы невозможно без тщательного изучения механических свойств этих элементов, в особенности, представляет сложность задача изучения возможностей работы пружин с такими нетрадиционными свойствами. Изучение реактивных усилий, возникающих в условиях воспрепятствования их свободному формовосстановлению после получения неупругих деформаций, приводит к необходимости расчета области этих деформаций, остаточных напряжений и других параметров.

В данной работе получены следующие основные результаты:

1. выведены формулы для расчета предельных нагрузок и определенных величины для пружин растяжения, сжатия и кручения;
2. получены зависимости, необходимые для расчета пружин за пределом упругости;
3. для рассматриваемых пружин предложены методы расчета остаточных параметров при пассивных нагружениях;

4. получены формулы для расчета реактивных усилий, а так же реактивных моментов, зависящих от остаточных параметров, пружин обладающих эффектом памяти формы;
5. экспериментально исследованы цилиндрические витые пружины (растяжения, сжатия и кручения) из материала с памятью формы, в частности из сплава никелида титана при работе: в упругой зоне деформирования, за пределом упругости, при активном и пассивном нагружениях, а также в условиях воспрепятствования процессу свободного формовосстановления при термосиловом воздействии;
6. разработаны алгоритмы, готовые для применения и рассчитаны на компьютерной программе в системе MathCAD: упруго-неупругое деформирование пружин, пассивные нагружения, остаточные параметры, предельные нагрузки и максимальные реактивные усилия (моменты) в условиях воспрепятствования процессу свободного формовосстановления при термосиловом воздействии;
7. Достоверность результатов проведенных исследований, а так же примененной предложенной методики расчета пружин из материалов с эффектом памяти формы доказаны на основе:
 - сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований;
 - обсуждений результатов исследований на научно – практических конференциях и семинарах различного уровня.

Результаты диссертационной работы имеют научно-техническое и прикладное значение, и может обеспечить более широкое внедрение материалов, обладающих нетрадиционными свойствами в производство при создании принципиально новых устройств и приборов, используемых в различных отраслях народного хозяйства.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. **Абдрахманов С.А.** О неупругом поведении пружин растяжения [текст] /Абдрахманов С.А.,Кожошов Т.Т.Инновации в образовании, науке и технике: Межд. научно-техн. конф.: материалы. Известия КГТУ. – 2006. № 5.-С. 343-346.
2. **Абдрахманов С.А.,** Особенности деформирования материалов, обладающих эффектом памяти формы и возможности их использования [текст] / Абдрахманов С.А.,Кожошов Т.Т.Джаналиев Н.Р., // Известия КГТУ.-2009. -№19. - С.75-81.
3. **Абдрахманов С.А.**О реактивном усилии пружины растяжения с эффектом памяти формы[текст]/ Абдрахманов С.А., Джаналиев Н.Р., Осмонканов А. М. Доталиева Ж.Ж.Кожошов Т.Т. // Известия КГТУ. – 2009. - №19.-С.275-279.
4. **Абдрахманов С.А.** Реактивные усилия в материалах с эффектом памяти формы при однородном и неоднородном напряженном состояниях [текст] /Абдрахманов С.А., Доталиева Ж.Ж., Джаналиев Н.Р.,Кожошов Т.Т.,Джанузакова А.А. Известия КГТУ.-2006.-№10.-С.153-158.

5. **Абдрахманов С.А.** О работе цилиндрической пружины обладающего эффектом памятью форм / Абдрахманов С.А., Кожошов Т.Т. Известия КГТУ.-2008.- № 14. -С.106-112.
6. **Абдрахманов С.А.** О деформации цилиндрической пружины в неупругой области [текст] / Абдрахманов С.А., Кожошов Т.Т., Вестник КГУСТА -2009. № 1. -том3. -С. 273-278.
7. **Абдрахманов С.А.** Характеристика цилиндрических пружин кручения из материала с памятью формы при разгрузке [текст] / Абдрахманов С.А., Кожошов Т.Т., Джаналиев Н.Р., Осмонканов А. М., КГУСТА 2011, № 2 (32), том2, стр.108-112
8. **Абдрахманов С.А.** О разгрузке цилиндрических пружин кручения из материала с памятью формы [текст] / Абдрахманов С.А., Доталиева Ж.Ж., Кожошов Т.Т. Распространение упругих и упругопластических волн: межд. конф. посвященная памяти академика, Героя соц. труда Х.А. Рахматуллина: труды. -Бишкек. –2011. -С. 241-244.
9. **Абдрахманов С.А.** Аналитическое исследование характеристик цилиндрических пружин с памятью формы [текст] / Абдрахманов С.А., Кожошов Т.Т., Джаналиев Н.Р., Доталиева Ж.Ж. Механика Композиционных Материалов и Конструкций: Всероссийский научный журнал. – Москва 2010. - том 16. - №1. -С.64-72.
10. **Абдрахманов С.А.** О предельной нагрузке для цилиндрической пружины растяжения, обладающей эффектом памяти формы [текст] / Абдрахманов С.А., Джаналиев Н.Р., Осмонканов А. М., Кожошов Т.Т. Наука и новые технологии: республиканский научно-технический журнал. Бишкек. – 2010. - №1. С. 12-15.
11. **Кожошов Т.Т.** Характеристики цилиндрических пружин кручения, изготовленных из материала, обладающего памятью формы [текст] / Кожошов Т.Т. Бишкек-2010. Известия вузов, №1, С. 7-13.
12. **Кожошов Т.Т.** Деформирование цилиндрических пружин кручения, изготовленных из материала обладающего памятью формы за пределом упругости [текст] / Кожошов Т.Т. Интернет-журнал ВАК Кыргызской Республики. 06. 12. 2011 г.
13. **Кожошов Т.Т.** Напряженно-деформированное состояние пружины кручения при разгрузке изготовленного из материала с ЭПФ [текст] / Кожошов Т.Т.-Б: Известия вузов, 2011, №6, стр. 3-6
14. **Кожошов Т.Т.** О генерации реактивных моментов цилиндрических пружин кручения с эффектом памяти формы [текст] / Кожошов Т.Т. –Б: Республиканский научно-теоретический журнал «Наука и новые технологии» №5, 2011г., стр. 17-20.

Резюме

диссертации КожошоваТалантбекаТынымсеитовичана тему «Расчет цилиндрических витых пружин с эффектом памяти формы» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: цилиндрические витые пружины, активное – пассивное нагружение, предельные нагрузки, остаточные параметры, реактивное усилие, реактивный момент, формовосстановление, термоупругие мартенситные превращения, память формы, температура.

Объект исследования:цилиндрические витые пружины (растяжения, сжатия и кручения), изготовленные из материала с эффектом памятью формы.

Цель работы:разработка методов расчета пружин за пределом упругости, а также определение изменения геометрических параметров в процессе деформирования при активном и пассивном нагружении. Разработка методов расчета реактивных усилий при термосиловом воздействии в условиях воспрепятствования ее формовосстановлению.

Результаты: разработан аналитический метод определения неупругих и остаточных деформаций и приведены методы расчета реактивных усилий, возникающих в процессе воспрепятствования формовосстановлению.

Рекомендации: новые методы расчета рекомендуется конструкторам, инженерам-расчетчикам при проектировании элементов и узлов конструкций с применением материалов, обладающих новыми функциональными возможностями.

Resume

KojoshovTalanbektynymseitovich

Bend of flexible beam from material by memory of form at thermo power influence.

Keywords: *flexible beam, memory of form, bend, loading, unloading, unresilient, remaining curvature, form reconstruction, fastening, reactive efforts, temperature.*

In this dissertation work research of flexible beams is conducted from materials with memory of form at unresilient bends and their conduct at thermo powerinfluence. Calculation formulas are shown out and the calculations of region of unresilient deformations are conducted clean and transversal bends. The process of unloading is studied and the method of calculation of form of remaining line for beams with different transversal sections is certain. The method of calculation of size of reactive effort, arising up in a beam at its form reconstruction in the straitened terms depending on character of fastening, temperature of influence and geometrical parameters, is developed. Calculations that are illustrated by the numerous graphs are resulted in work.

КожошовТалантбекТынымсеитовичтин

01.02.04 Деформациялануучу каттуу телолордун механикасы» адистиги боюнча «Ёзкалыбын эскетутуу жөнөдөмдүк материалдардан жасалган цилиндр пружиналарын эсептөө»

диссертациясынын темасы боюнча физико-

математика илимдин кандидатын атала берилми ийизилдөө ишинин резюмеси.

Негизгисездөр: цилиндр пружиналары, активдүү – пассивдүү жиктөө, пределдик жик, калдык параметрлер, реактивдүү жик, ёзкалыбын эскетутуу, температура.

Изилдөө объектиси: Ёзкалыбын эсеп калуу жөнөдөмдүкнө ээ болгон цилиндр (чоюу, кысуу жана буралуу) пружиналары.

Жумуштун негизи: пружиналардын серпилгич эмес (чоюу, кысуу жана буралуу) деформациялашында, кичтөрдүк шалып таштоо процессинин изилдөөдө, калдык формасын эсептөө кысасын аныкталууда.

Ёзкалыбына келүү процессинетоскоолдук кылуучурунда пайда болгон реактивдүү жиктөрдүк эсептөө кысасын иштетип чыгууда, ал кичтөрдүк бекитүү кысасынан, жылытуудан жана геометриялык чөйдүктөрдөн болгон көзкарандылыгы аныкталууда.

Жыйынты-

гы: аналитикалык метод боюнча серпилгич эмес деформациялардын чектери аныкталган, эсептөө формулалары чыгарылган. Калдык формасын эсептөө кысасы аныкталган.

Ёзкалыбына келүү процессинетоскоолдук кылуучурунда пайда болгон реактивдүү жиктөрдүк эсептөө кысасын иштетип чыккан.

Сунуш-

тар: жаңы табылган аналитикалык эсептөө методдору конструкторлорго жана инженерлерге сунушталат.

Бул методдор ёзкалыбын эскетутуу жөнөдөмдүк материалдардан жасалган жааы функцияларды кичтөрдүк шалып таштоо элементтерди колдонууга кеңири жол ачат.

Подписано к печати 02.05.2012г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать офс. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

г. Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ “Текник” КГТУ, т.: 54-29-43

E-mail: beknur@mail.ru

