

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ ВИТЫХ ПРУЖИН С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ

Андронов И.Н.¹, Демина М.Ю.², Полугрудова Л.С.²

¹Ухтинский государственный технический университет, Ухта

²Сыктывкарский лесной институт (филиал) Санкт-Петербургского лесотехнического университета, Сыктывкар, Россия
mdemina59@mail.ru

Предложен метод расчета напряжений и деформаций, возникающих в витой цилиндрической пружине при теплосменах в условиях действия растягивающей силы постоянной величины, приложенной вдоль оси пружины. Получены формулы для сдвиговой и осевой деформаций, касательного и нормального напряжений, которые, в отличие от принятых методов расчета [1-2], учитывают зависимость от диаметра витка и удлинения пружины. Основные расчетные параметры определяли из экспериментов по термоциклированию пружины, выполненной из проволоки сплава TiNi эквиатомного состава, характеристические температуры мартенситных переходов которого составляют: $M_s = 323$ К, $M_f = 303$ К, $A_s = 328$ К, $A_f = 348$ К [3].

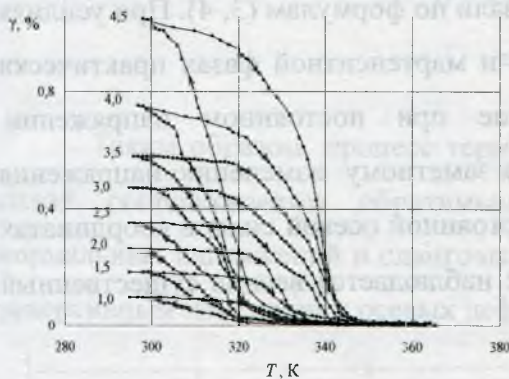


Рисунок 1. Температурная зависимость сдвиговой деформации материала пружины при постоянных значениях осевой силы натяжения (указаны в ньютонах цифрами у кривых)

В опытах наблюдалась сильная зависимость D от P , которую при определении деформаций и напряжений учитывали введением поправочной функции $f(P_i)$, полученной из экспериментальных данных. Величину сдвиговой деформации γ , накапливаемой при охлаждении и восстанавливаемой при нагреве, определяли по формуле (1). Температурные кривые сдвиговой деформации (рис. 1)

Пружина изготавливалась из проволоки диаметром $d = 0,002$ м путем навивания на оправку $d_0 = 0,025$ м и последующим отжигом, начальный диаметр витков пружины составил $D_0 = d_0 + d = 0,027$ м, количество рабочих витков $n = 22$. Пружину нагревали до температуры $T_{max} = 363$ К, нагружали в аустенитном состоянии и осуществляли полный термоцикл в температурном интервале $T_{max} \leftrightarrow T_{min} = 297$ К под постоянной осевой

идентичны экспериментальным температурным зависимостям удлинения пружины $\delta(T)$.

$$\gamma = \frac{d \cdot \arctg\left(\frac{d + \delta/n}{\pi(D-d)}\right) - d \cdot \arctg\left(\frac{d}{\pi(D-d)}\right)}{2\pi(D-d)} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{(D-d)d}{(D-d)^2 + \left(\frac{d + \delta/n}{\pi}\right)^2} - \frac{(D_0-d)d}{(D_0-d)^2 + \left(\frac{d}{\pi}\right)^2} \quad (2)$$

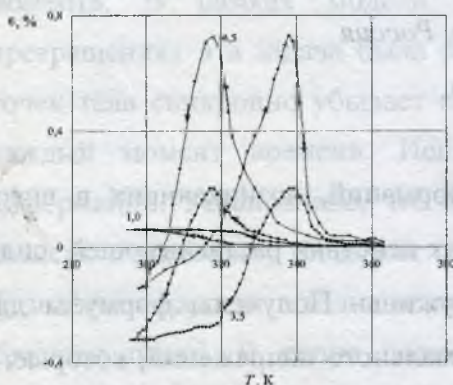


Рисунок 2. Температурная зависимость осевой деформации материала пружины при постоянных значениях осевой силы натяжения (указаны в ньютонах цифрами у кривых)

Существенное качественное отличие демонстрировали температурные зависимости осевой деформации, определенной по формуле (2), от температуры (рис. 2). При малых растягивающих силах ($P = 1$ Н) температурные зависимости подобны таковым для сдвиговых деформаций, при возрастании растягивающей силы ($P = 3,5; 4,5$ Н) на кривых $\varepsilon(T)$ проявляется

ярко выраженный характер реверсивного формоизменения. Касательное и нормальное напряжения, действующие в материале, рассчитывали по формулам (3, 4). При усилиях 1,0 – 2,0 Н значения напряжения в аустенитной и мартенситной фазах практически одинаковы, т.е. происходит термоциклирование при постоянном напряжении. Повышение осевой силы до 2,0 – 4,5 Н приводит к заметному изменению напряжения в процессе изменения температуры. Изолинии постоянной осевой силы в координатах $\sigma - T$ качественно отличаются от изолиний $\tau - T$: наблюдается весьма существенный рост нормальных напряжений при увеличении температуры и уменьшение при ее снижении за термоцикл, например, в 16,8 раз при $P = 4,5$ Н. Связь касательного напряжения и сдвиговой деформации материала пружины при термоциклировании при постоянной осевой силе натяжения показана на рисунке 3.

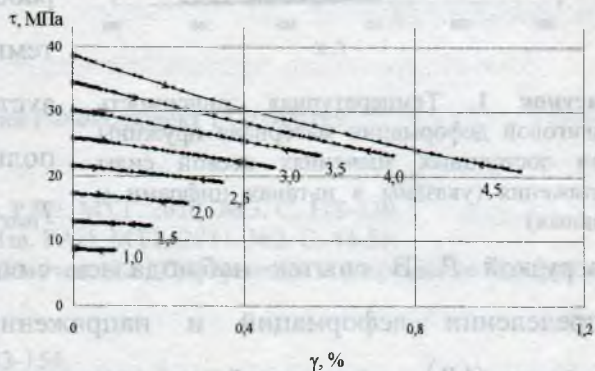


Рисунок 3. Изолинии постоянной осевой силы натяжения (значения в Н указаны цифрами у кривых) в координатах $\tau - \gamma$

$$\tau = \frac{8P(D-d)}{\pi d^3 \sqrt{1 + \left(\frac{d + \delta/n}{\pi(D-d)} \right)^2}} \quad (3)$$

Изолинии, соответствующие приложенной к пружине растягивающей нагрузке

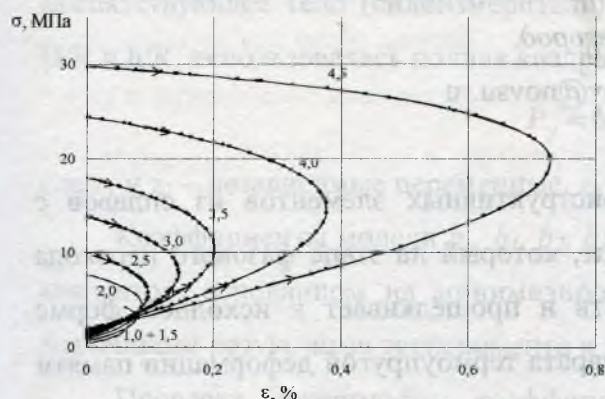


Рисунок 4. Изолинии постоянной осевой силы натяжения (значения в Н указаны у обозначений) в координатах $\sigma - \varepsilon$

в 3 – 4,5 Н, показывают монотонное уменьшение касательных напряжений в нитиноле при удлинении пружины (при охлаждении), и их увеличение при укорочении (при нагреве). Существенно более сложный вид изолиний наблюдается в координатах $\sigma - \varepsilon$ (рис. 4). При охлаждении пружины нормальное напряжение сначала демонстрирует рост, а затем

падение, что приводит к реверсивному виду изолиний в координатах напряжение деформация.

$$\sigma = \frac{16P(D-d) \left(\frac{d + \delta/n}{\pi(D-d)} \right)}{\pi d^3 \sqrt{1 + \left(\frac{d + \delta/n}{\pi(D-d)} \right)^2}} \quad (4)$$

Таким образом, процесс термоциклирования пружины под постоянной осевой силой сопровождается обратимым гистерезисным изменением касательных и нормальных напряжений и сдвиговых деформаций, а также обратимым гистерезисно-реверсивным изменением осевых деформаций.

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
2. Otsuka K., Wayman C. M. Shape Memory Materials. Cambridge University Press, chapter 2. 1999. P. 240 – 266.
3. Корнилов И.И., Белоусов О.К., Качур Е.В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом "памяти". М.: Наука, 1977. 180 с.