

05;12

Появление двусторонней памяти формы в нитиноловой пружине при циклировании температуры и деформации

© А.Г. Манджавидзе, В.А. Барнов, Л.И. Джорджишвили, С.В. Соболевская

Институт физики им. Э. Андроникашвили,
0177 Тбилиси, Грузия
e-mail: svetlanasobol@yahoo.com

(Поступило в Редакцию 3 мая 2007 г.)

Проведены исследования свойств цилиндрической спиральной пружины из нитинола (сплава с эффектом памяти формы), установлено, что при использовании ее в качестве рабочего элемента в роторных мартенситных двигателях появление двустороннего (двунаправленного) эффекта памяти формы снижает эффективность работы двигателя.

PACS: 77.84.Dy, 81.30.Kf, 44.90.+c

Введение

Рабочим элементом в роторном двигателе могли бы служить проволока или лента из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ), в частности из нитинола. Чтобы изготовить такой двигатель, кроме прецизионных узлов кинематики приходится преодолевать проблему соединения концов проволоки в петлю и очень точно регулировать ее натяжение, имея в виду, что в нагруженном состоянии при изменении нагрузки меняются температуры начала и конца мартенситного перехода [1]. Нитинол не паяется, а сварные узлы меняют свои физические свойства и через несколько циклов нагрева–охлаждения рвутся. Нами был выбран другой вариант рабочего элемента из данного сплава.

Экспериментальная часть

В качестве рабочего элемента в моделях двигателей [2,3] использовалась цилиндрическая спиральная пружина, изготовленная из проволоки (состав сплава: Ti — 44.82; Ni — 49.16; Cu — 6.02%) фирмы „Фурукава“ (Япония). Применение таких пружин имеет определенные преимущества по сравнению с рабочим элементом в виде проволоки.

В отличие от проволоки, на которую при работе двигателя действуют силы растяжения–сжатия, при растяжении–сжатии пружины на ее материал действуют силы кручения–изгиба. Поэтому на пружине можно получать большие значения деформации и при этом иметь слабое изменение температур начала и конца мартенситного и аустенитного превращений. Легко решается проблема соединения концов пружины в петлю — концевые витки цепляются друг за друга и фиксируются обмоткой мягкого провода. Пружина в виде петли может быть растянута на 600% без потери материалом проволоки эффекта памяти формы и легко надета на систему шкивов роторного двигателя.

Пружина, используемая в качестве рабочего элемента, изготавливалась по следующей технологии. Нитиноловая проволока диаметром $d_w = 0.00085$ м плотно (виток к витку) наматывалась на стержень (оправку) диаметром $d_R = 0.004$ м. Натяжение проволоки при намотке поддерживалось по возможности постоянным. Концы проволоки жестко закреплялись на стержне и пружина вместе со стержнем помещалась в вакуумную камеру печи и отжигалась либо в вакууме, либо в инертной атмосфере (в гелии) при температуре $T_{An} = 450^\circ\text{C}$ в течение 40 min, после чего медленно охлаждалась вместе с печью до комнатной температуры. После снятия со стержня и освобождения концов пружина имела шаг, равный диаметру проволоки ($h_0 = d_w$), средний диаметр витка, равный $D_A = d_R + d_w$, коэффициент упругости $C = (D_A/d_w) = 5.7$ и оставалась однородной по всей длине. Эффект памяти формы пружина сохраняла при ее растяжении почти в 7 раз (на 600%). Часть пружины использовалась для исследования ее характеристик при разных температурах и нагрузках, а часть — для изготовления рабочего элемента роторного двигателя.

Замкнутая петля, изготовленная из пружины длиной $L_S = 0.81$ м, надевалась на систему шкивов и вспомогательных роликов двигателя, рабочий периметр которых составил $L_P = 1.63$ м, что соответствовало полной предварительной деформации пружины $\varepsilon_0 = 100\%$ (т.е. удлинение ее в 2 раза). Было установлено, что при такой деформации пружина выдерживала наибольшее число циклов работы в роторном двигателе.

Характерной особенностью пружины с ЭПФ является то, что в аустенитном состоянии она работает как обычная пружина в широком интервале деформации (т.е. обладает сверхупругостью), в то время как в мартенситном состоянии область упругости значительно уже, и при малых деформациях пружина попадает в область пластичности, которая в определенных пределах (до 600%) почти полностью исчезает при переводе рабочего материала в аустенитную фазу (в ненапряженном состоянии). По этой причине диаграмма зависимости

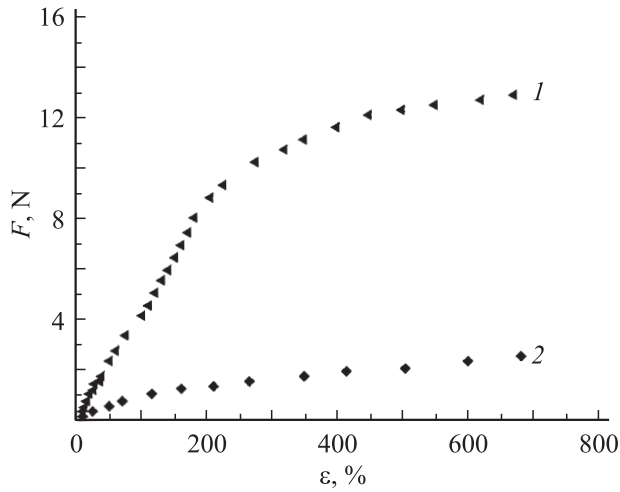


Рис. 1. Диаграммы растяжения нитиноловой пружины в аустенитном (1, 90°C) и мартенситном (2, 20°C) состояниях.

осевой силы натяжения пружины от ее деформации ($F(\varepsilon)$) в аустенитной фазе линейна (в широкой области деформаций), а в мартенситной фазе должна быть нелинейной, что и наблюдается на эксперименте (рис. 1).

Как видно из рисунка, в аустенитной фазе ($T = 90^\circ\text{C}$) линейная область зависимости $F = f(\varepsilon)$ имеет ширину 200%, а в мартенситной фазе ($T = 20^\circ\text{C}$) ее ширина равна 50%. С ростом деформации в аустенитной фазе происходит отклонение зависимости от линейной и при достижении величины $\varepsilon = 200\%$ начинается область пластического течения, после снятия нагрузки деформация полностью не исчезает. В мартенситной фазе пластическое течение начинается выше $\varepsilon = 50\%$. Кроме того, эксперименты на пружинах показали, что

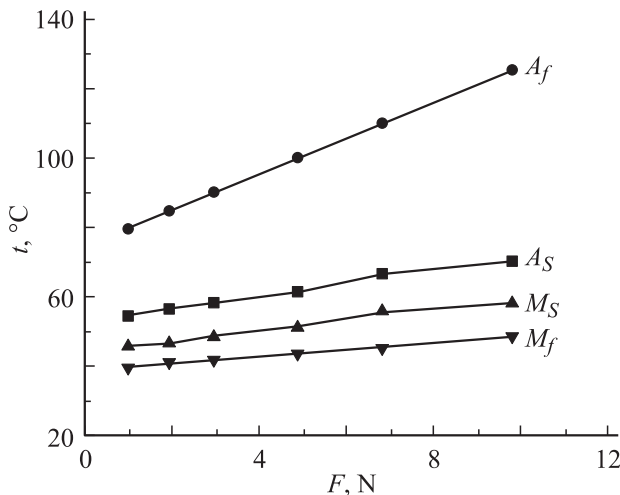


Рис. 2. Зависимости температур начала и конца переходов от силы натяжения проволоки: A_s — температура начала перехода из мартенситного состояния в аустенитное, A_f — температура конца этого перехода; M_s — температура начала перехода из аустенитного состояния в мартенситное, M_f — температура конца этого перехода.

характерные температуры начала и конца фазовых переходов незначительно зависят от величины нагрузки, в то время как в случае проволоки наблюдается смещение температур переходов [1], особенно существенное (в наших экспериментах) для температуры конца перехода в аустенитное состояние, A_f (рис. 2).

При испытании моделей тепловых двигателей [3] с нитиноловой пружиной в качестве рабочего элемента было обнаружено понижение эффективности их работы. Когда пружина служит рабочим элементом в роторном мартенситном двигателе, она попадает в сложную ситуацию — часть неконтролируемых факторов, проявляющихся при работе двигателя, затрудняет установление истинной причины изменения свойств материала пружины. Известно, что свойства нитинола зависят от многих причин — способа задания предварительной деформации и ее величины, температуры деформации T_D , скорости изменения температуры и деформации и т.д. [4].

В процессе работы двигателя пружина претерпевает многократные циклические изменения температуры и деформации, сопровождающиеся фазовыми переходами из мартенситного состояния в аустенитное и обратно, из аустенитного состояния в мартенситное. Следует подчеркнуть, что эти переходы происходят не в свободном материале, а в материале, находящемся в условиях ограниченной возможности восстановления формы. Поэтому при фазовых переходах в пружине возникают дополнительные напряжения, приводящие к изменению ее свойств. При интенсивном охлаждении рабочего элемента после длительной работы двигателя начиналась пробуксовка пружины по рабочим поверхностям шкивов и двигатель останавливался. При полном охлаждении пружины ниже температуры конца мартенситного превращения M_f она удлинялась до $L_F = 1.91 \pm 0.01$ м. При переводе свободной (ненагруженной) пружины в аустенитное состояние она почти полностью восстанавливала первоначальную (до деформации) длину L_S , однако после перевода в мартенситную фазу вновь удлинялась до той же длины L_F . Иными словами, у нитиноловой пружины, проработавшей в двигателе, появилась двусторонняя память формы: пружина запомнила начальную длину L_S , которую всегда воспроизводила в аустенитном состоянии, и некоторую длину L_F , существенно большую, чем L_S , которую всегда воспроизводила в мартенситном состоянии. Интересно отметить, что конечная длина охлажденной пружины составляла примерно 1.91 м.

В связи с вышесказанным изучалось влияние величины начальной деформации на возникновение невосстанавливаемой деформации в нитиноловой пружине. Пружина во время эксперимента выдерживалась при постоянной температуре, равной 90°C . Было проведено 7 циклов нагружения и разгрузки. Каждый цикл доводился до определенного максимального значения осевой силы, действующей на пружину, а следовательно, до определенного значения деформации, являющегося максимальным для данного цикла, ε_{\max} . Полученные

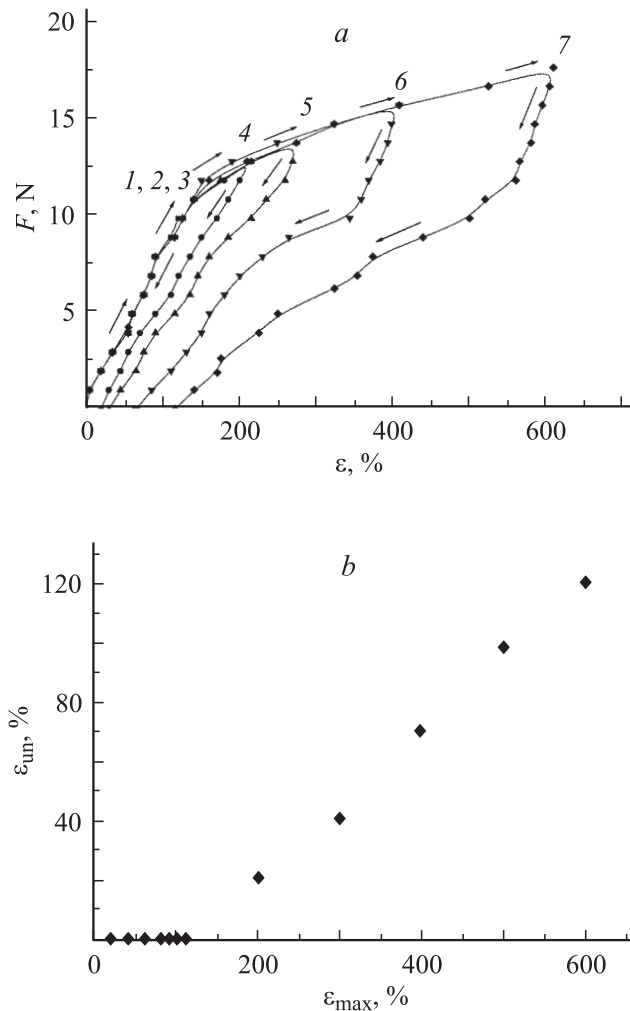


Рис. 3. *a* — зависимость осевой силы натяжения пружины от ее деформации. Представлено 7 циклов нагружения и разгрузки (1 — 50, 2 — 80, 3 — 110, 4 — 220, 5 — 270, 6 — 400, 7 — 600%). Температура пружины выдерживалась равной 90°C. *b* — зависимость величины невосстанавливаемой деформации в мартенситном состоянии пружины от величины исходной пластической деформации (построена по данным рис. 3, *a*).

результаты приведены на рис. 3, *a*. Как видно из этого рисунка, с ростом максимальной деформации после определенного цикла нагружения и разгрузки появляется невосстанавливаемая часть деформации (ϵ_{un}), которая линейно растет при увеличении нагрузки, что хорошо прослеживается на рис. 3, *b*, где представлена зависимость величины невосстанавливаемой деформации от ϵ_{max} , построенная по данным указанного эксперимента.

Следовательно, циклирование деформации пружины в упругой области (до 110%) не вызывает появления невосстанавливаемой деформации. При переходе в область пластичности наблюдается ϵ_{un} , величина которой растет линейно с ϵ_{max} . Именно в этой области дефор-

маций возникает эффект двусторонней памяти формы, когда температура пружины при ее охлаждении переходит через значение M_S (M_S — температура начала перехода материала пружины из аустенитного состояния в мартенситное).

Таким образом, при работе роторного мартенситного двигателя выполняется одно из условий появления эффекта двусторонней памяти формы [4], а именно из-за наличия замкнутой формы рабочего элемента (предварительно продеформированного на ϵ_0) он претерпевает циклирование в аустенитном и в мартенситном состояниях и испытывает дополнительное деформирование примерно на 20%.

Появление двусторонней памяти формы оказывает отрицательное влияние на эффективность работы двигателя, так как излишнее удлинение пружины сопровождается ее пробуксовкой на шкивах и соответственно уменьшением силовых характеристик двигателя. В связи с этим возникла необходимость ограничения излишнего охлаждения пружины так, чтобы она не удлинялась больше необходимого размера. При работе двигателя в таких условиях пружина не должна охлаждаться ниже M_f , т.е. не полностью переходить в мартенситное состояние. Это, с одной стороны, является положительным фактором, поскольку обеспечиваются необходимый обхват шкивов и хорошие условия для передачи усилия, но с другой стороны, отрицательным, так как уменьшается разность сил, возникающих в горячей и холодной ветвях пружины, как это видно из рис. 4, где представлены диаграммы растяжения нитиноловой пружины при разных температурах. По мере увеличения температуры пружины диаграмма в мартенситной фазе поднимается вверх, приближаясь к аустенитной диаграмме, а при понижении температуры из аустенитного состояния диаграмма опускается и сближается с мартенситной.

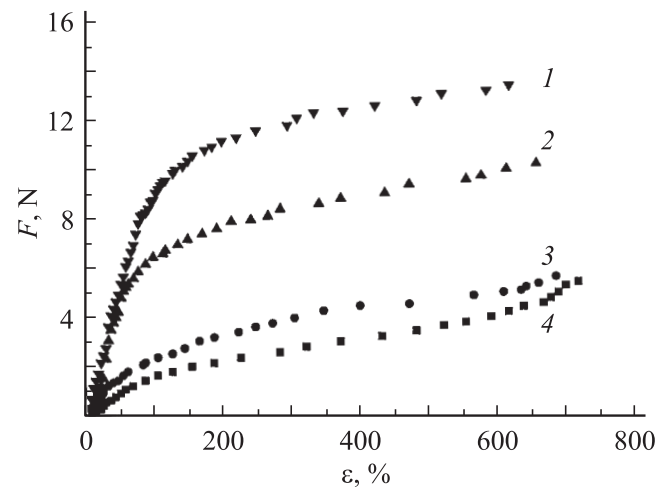


Рис. 4. Зависимость осевой силы натяжения от величины деформации пружины при разных температурах (1 — 90, 2 — 81, 3 — 75, 4 — 22°C).

Заключение

Таким образом, нитиноловую пружину следует либо деформировать не более чем на 60% (в этом случае пружина не удлиняется во время работы двигателя), но из-за малости деформации разность сил натяжения мартенситной и аустенитной ветвей невелика — это является отрицательным фактором; либо ее надо охлаждать так, чтобы разность сил натяжения между холодной (мартенситная фаза, 22°C) и горячей (аустенитная фаза, 90°C) ветвями пружины была по возможности большая, а пружина самопроизвольно не удлинилась бы более периметра обхвата шкивов. В нашем случае это условие подбирается экспериментально путем регулировки расхода охлаждающей воды.

Список литературы

- [1] Schiller E.H. // Heat Engine Driven by Shape Memory Alloys: Prototyping and Design. Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University for a degree of Master of Science. Blacksburg, VA, 2002. 72 p.
- [2] Манджavidze А.Г., Маргвелашивили О.В., Саралидзе З.К. и др. Ас. 7237 „Роторный двигатель“ в „Группатенте“. 2003.
- [3] Манджavidze А.Г., Барнов В.А., Соболевская С.В., Маргвелашивили О.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 131–133. (Manjavidze A.G., Barnov V.A., Sobolevskaya S.V., Margvelashvili O.V. // Techn. Phys. 2006. T. 51. N 5. P. 663–665.)
- [4] Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю., Сэкигути Ю., Тадаки Ц., Хомма Т., Миядзаки С. Сплавы с эффектом памяти формы / Пер. под ред. А.М. Глезера. М.: Металлургия, 1990. 224 с.