ЛИТЕРАТУРА

1. *Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П.* Эффект памяти формы Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 216 с.
2. *Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. и др.* Сплавы с эффектом памяти формы / под ред. Х. Фунакубо; пер. с япон. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
3. *Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В.* Никелид титана: структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.
4. *Андронов И.Н., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А.* Термоциклическая ползучесть медно-марганцевых сплавов, связанная с ГЦК <=> ГЦТ превращениями // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1983. № 3. С. 84-88.
5. *Андронов И.Н., Какулия Ю.Б., Лихачев В.А.* Термоциклическая деформация сплава Cu – 62,5 % Mn в условиях сложного нагружения // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1989. № 1. С. 88-92.
6. *Андронов И.Н., Овчинников С.К.* Эффекты обратимого формоизменения никелида титана при термоциклировании // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 5. С. 28-30.
7. *Андронов И.Н., Вербаховская Р.А., Овчинников С.К., Северова Н.А.* Эффекты обратимой памяти формы и термоциклического возврата деформации в сплаве ТН-1 // Заводская лаборатория. Диагностика материала. 2007. Т. 73. № 2. С. 64-67.

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Andronov I.N., Verbakhovskaya R.A. GROWTH OF NON-CLOSENESS OF THERMOMECHANICAL HYSTERESIS ALLOY TN-1 DURING THERMAL CYCLING IN FIXED TEMPERATURE INTERVALS

Key words: mechanic cycling; shape memory alloys; nickelide titanium.

The non-closeness of thermo-mechanical hysteresis is researched.

УДК 539

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В НИТИНОЛОВОЙ ПРУЖИНЕ

© М.Ю. Демина, И.Н. Андронов, Л.С. Полугрудова

Ключевые слова: эффект памяти формы; пластичность превращения; нитиноловая пружина.

Проведено исследование эффектов памяти формы и пластичности превращения в цилиндрической спиральной пружине из нитинола (сплава с эффектом памяти формы), нагреваемой прямым пропусканием постоянного электрического тока.

Сплавы с эффектом памяти формы применяются в качестве рабочего элемента в различных устройствах, двигателях, приспособлениях. Форма элемента в зависимости от конструкции может быть любой: стержень, проволока, пружина и т. д. [1–2]. При растяжении-сжатии пружины на ее материал действуют силы кручения-изгиба, что позволяет получать большие деформации при незначительном изменении температур начала и конца мартенситно-аустенитного превращения [3].

В данном исследовании использовали цилиндрическую спиральную пружину, выполненную из проволоки сплава TiNi эквиатомного состава. Для данного материала температуры мартенситных переходов составляют: $M_н$ = 323 К, $M_к$ = 293 К, $A_н$ = 328 К, $A_к$ = 348 К. Пружина изготавливалась по следующей технологии. На металлический стержень (оправку) диаметром d = = 0,025 м плотно (виток и витку) наматывалась нитиноловая проволока диаметром d_0 = 0,002 м. Натяжение проволоки при намотке поддерживали постоянным. Концы проволоки жестко закреплялись на стержне, затем пружина вместе со стержнем помещалась в камеру печи и отжигалась при температуре 773 К в течение 60 мин., после чего медленно охлаждалась вместе с печью до комнатной температуры. После снятия со стержня и освобождения концов пружина имела шаг, равный диаметру проволоки $h = d$, средний диаметр витка, равный $D = d + d_0$ = 0,027 м, коэффициент упругости $C = D/d$ = 13,5, количество рабочих витков 22 и оставалась однородной по всей длине.

Эксперимент проводили следующим образом: пружину нагревали до температуры T_{max} = 363 К, нагружали в аустенитном состоянии и термоциклировали под постоянной осевой нагрузкой через интервал мартенситного превращения, определяя деформацию накапливаемую при охлаждении (эффект пластичности превращения) и восстанавливаемую на этапе нагрева (эффект памяти формы). При температуре T_{max} пружину разгружали, затем снова проводили термоцикл через интервал превращений, но уже без нагрузки, определяя величину эффекта обратимой памяти формы.

Нагрев пружины осуществляли постоянным электрическим током, в экспериментальную установку входили источник тока со встроенным потенциометром, амперметр и вольтметр. Электрическое напряжение подавали на концы пружины, один из которых был зафиксирован в неподвижном захвате, а к противоположному прикладывалась осевая сила натяжения. Величину тока, пропускаемого через пружину, варьировали от 2 до 4 А, поддерживая постоянной скорость нагрева 1 К/мин.

Зависимость удлинения пружины при термоциклировании, полученная при разных значениях осевой нагрузки, имеет вид петли гистерезиса (рис. 1). Высота петли, т. е. деформация, обусловленная пластичностью превращения, зависит от приложенного усилия и увеличивается с ростом нагрузки.

На рис. 2 приведена зависимость максимальной деформации, накапливающейся на этапе охлаждения и восстанавливающейся при нагреве под постоянной нагрузкой. Кривая, связывающая удлинение пружины и приложенную осевую нагрузку, имеет вид, близкий к прямой зависимости (величина достоверности аппрок-

симации составляет 0,9954), причем функция оказывается практически одинаковой для нагрева и охлаждения. Таким образом, для пружины подтверждается закономерность пластичности превращения: прямо пропорциональная связь между приложенными напряжениями и возникающими деформациями [4].

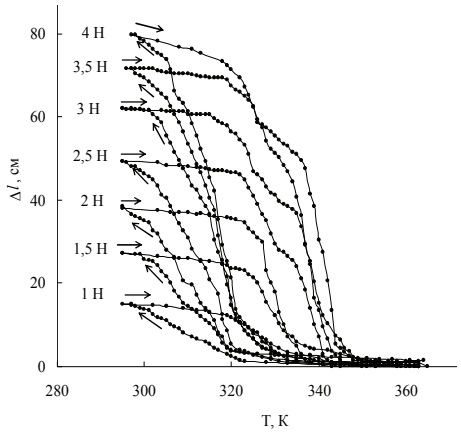

Рис. 1. Температурная зависимость абсолютного удлинения пружины при разных значениях осевой силы натяжения (указаны цифрами у кривых)

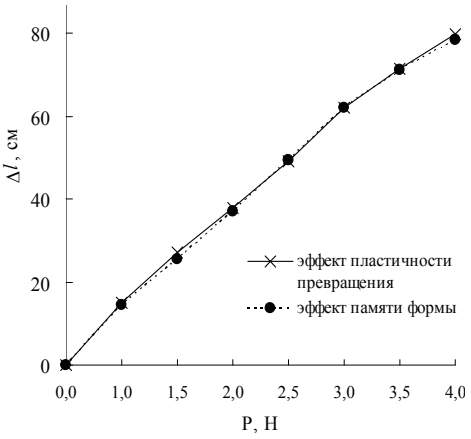

Рис. 2. Зависимость эффектов пластичности превращения и памяти формы от осевой силы натяжения

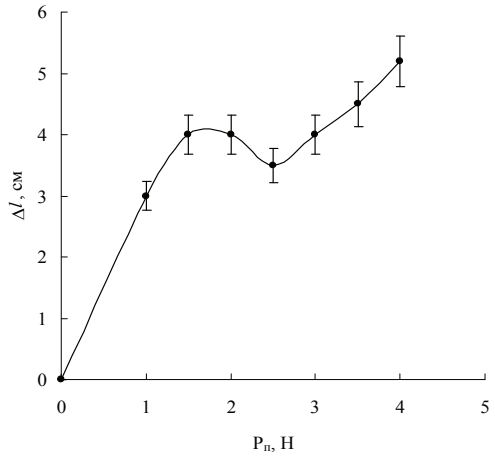

Рис. 3. Зависимость эффекта обратимой памяти формы от величины предварительной осевой силы натяжения

Предварительное термоциклирование под нагрузкой через интервалы мартенситных превращений формирует в пружине из никелида титана эффект обратимой памяти формы, проявляющийся при последующем термоциклировании без внешних усилий (рис. 3). Повышение степени предварительной деформации усиливает эффект, величина которого вначале возрастает, а затем достигает максимального значения и практически не изменяется.

На этапе охлаждения под нагрузкой пружина значительно удлиняется, при этом уменьшается диаметр ее витков, и увеличивается расстояние между ними, значение которого линейно зависит от приложенной нагрузки (рис. 4). При наибольшей осевой силе, прилагаемой в проведенных опытах, относительное удлинение пружины достигало 14,5 %, относительное уменьшение диаметра витков – 22,2 %, максимальное расстояние между витками – 0,04 м. Наблюдалась определенная последовательность деформаций: при охлаждении пружина сначала раскручивалась, затем сжималась, а при нагреве сначала сжималась, затем закручивалась. Таким образом, имеется возможность управления формой траектории материалов с памятью формы в пространстве деформаций не только последовательностью предварительно приложенных усилий, а также приданием определенной формы образцу, например, в виде пружины.

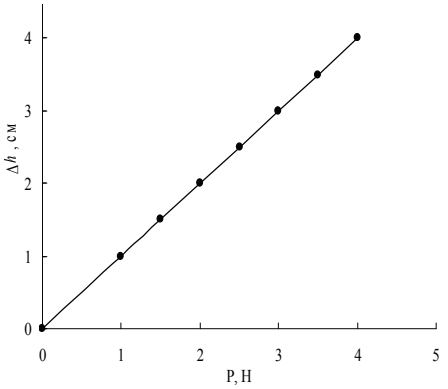

Рис. 4. Зависимость расстояния между витками пружины от осевой силы натяжения

ЛИТЕРАТУРА

1. The design of shape memory alloy actuator and their applications // Shape Memory Materials / eds. K. Otsuka, C.M. Wayman. Cambridge, 1998. P. 240-266.
2. *Беляев С.П., Демина М.Ю.* Термомеханические характеристики пружинного привода с рабочим элементом из сплава TiNi с памятью формы // Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы: труды 38 Международного семинара «Актуальные проблемы прочности». СПб., 2001. Ч. 2. С. 456-459.
3. *Манджавидзе А.Г., Барнов В.А., Джорджишвили Л.И., Соболевская С.В.* Появление двусторонней памяти формы в нитиноловой пружине при циклировании температуры и деформации // Журнал технической физики. 2008. Т. 78. Вып. 3. С. 95-98.
4. *Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П.* Эффект памяти формы. Л., 1987. 216 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Demina M.Y., Andronov I.N., Polugrudova L.S. SHAPE MEMORY EFFECT IN NITINOL SPRING

Shape memory effect and transformation plasticity in a cylindrical helical nitinol spring (shape memory effect alloy) heating directly by passing direct current are investigated.

Key words: shape memory effect; transformation plasticity; nitinol spring.