

05;12

## **Задержка обратимого формоизменения в никелиде титана после незавершенного цикла превращения**

© С.П. Беляев, А.Е. Волков, А.И. Разов

Научно-исследовательский институт математики и механики  
им. В.И. Смирнова С.-Петербургского государственного университета

Поступило в Редакцию 5 июля 1999 г.

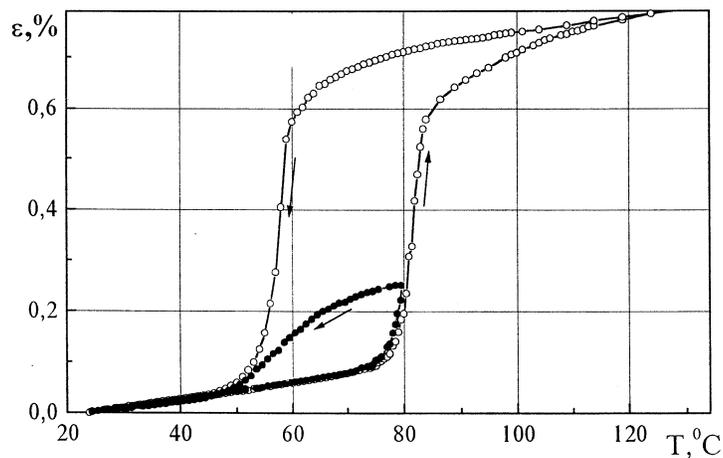
Исследовали особенности проявления обратимой памяти формы в эквИАтомном сплаве TiNi после цикла в неполном интервале температур мартенситного превращения. Обнаружено, что в процессе реализации обратимой памяти формы имеет место SMART-эффект, выражающийся в температурной задержке деформирования при нагревании. Задержка происходит при той же температуре, при которой прерывали превращение в предварительном термоцикле, а ее величина составляет 3°C.

Сплавы, претерпевающие термоупругие мартенситные превращения, демонстрируют разнообразные эффекты "запоминания" механической и термической предыстории. К ним относится, прежде всего, эффект памяти формы, выражающийся в возврате предварительно заданной деформации в процессе нагревания через интервал температур превращения [1,2]. Более сложный феномен, получивший название реверсивной памяти формы, по существу, представляет собой явление запоминания пути, по которому производилось нагружение материала. Информация об этом пути оказывается сохраненной в доменной структуре мартенсита и, при выполнении некоторых условий, воспроизводится при переходе мартенсит → аустенит [3]. Кроме этих хорошо изученных явлений в последние годы обсуждается так называемый SMART-эффект (Step-wise Martensite to Austenite Reversible Transformation) [4-8]. Это особый вид памяти, который инициируется предварительным незавершенным циклом превращения при нагревании (НЦПН), т.е. процедурой, в которой превращение мартенсин → аустенит прерывают в интервале температур  $A_s - A_f$  и производят охлаждение, переводя материал в мартенситное состояние. Если теперь осуществлять нагрев

через полный интервал обратного превращения, монотонно повышая температуру, то можно наблюдать характерную особенность температурной кинетики превращения. Эта особенность заключается в том, что в процессе нагрева будет иметь место задержка превращения. Это особенность заключается в том, что в процессе нагрева будет иметь место задержка превращения, которая выражается в появлении "ступеньки" на температурной зависимости какой-либо физической величины, чувствительной к изменению фазового состояния. Задержка превращения возникает при той температуре, где прерывали фазовый переход в ходе предварительного НЦПН, или при несколько большей температуре. В том случае, когда НЦПН производят несколько раз с понижающейся от цикла к циклу температурой прерывания обратного перехода, при последующем полном превращении происходит столько задержек, сколько НЦПН этому предшествовало. Описанное поведение классифицируют как SMART-эффект, который наблюдали на сплавах TiNi, TiNiFe, TiNiCu, AgCd, CuAlZn. Фактически сказанное означает, что различные сплавы с термоупругими мартенситными превращениями обладают способностью "помнить" последовательность незавершенных превращений мартенсит  $\rightarrow$  аустенит.

Для объяснения физических причин SMART-эффекта привлекают две рабочие гипотезы. Первая из них основана на роли дефектов решетки, локализованных вблизи межфазных границ, которые наследуются мартенситной фазой и сохраняются в материале после НЦПН. Предполагается, что эти скопления дефектов действуют как центры пиннинга (закрепления) движущейся межфазной границы при реализации SMART-эффекта. Другая гипотеза связана с процессами локальной релаксации упругой энергии на межфазной границе, в результате чего движущая сила превращения уменьшается и для его продолжения необходим дополнительный подвод тепла.

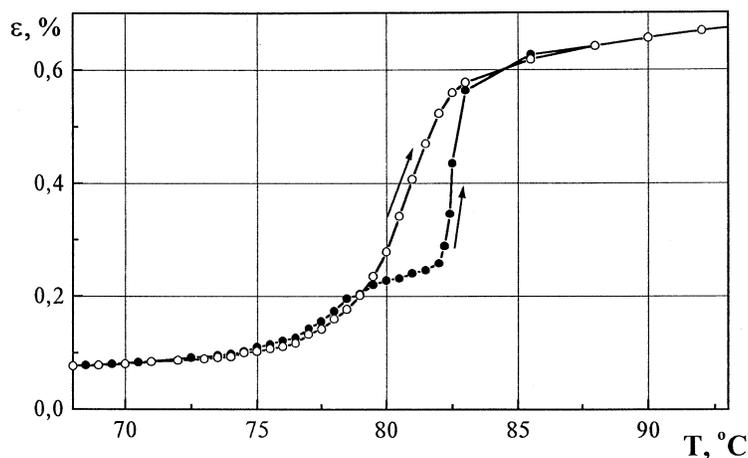
SMART-эффект наблюдали, главным образом, при изменении температурных зависимостей электросопротивления и в калориметрических экспериментах. Однако понятно, что изменение температурной кинетики мартенситного превращения должно сказываться и на ходе деформационных процессов, связанных с превращением. Действительно, недавно было опубликовано сообщение об обнаружении SMART-эффекта на механических гистерезисных петлях в сверхупругом сплаве TiNi [8].



**Рис. 1.** Зависимости деформации от температуры, иллюстрирующие самопроизвольное формоизменение образца сплава TiNi в термоцикле через интервал превращений (светлые значки) и в незавершенном цикле при нагревании (черные значки).

В настоящей работе представлены первые экспериментальные данные, посвященные исследованию SMART-эффекта при реализации обратной памяти формы в TiNi.

Опыты выполняли на проволочных образцах приблизительно экваторного сплава TiNi. Диаметр образцов был равен 3 mm, а их длина 550 mm. При комнатной температуре сплав находился в мартенситном состоянии. Образцы изотермически деформировали растяжением на 12%, после чего в разгруженном состоянии они самопроизвольно обратимо деформировались при термоциклировании через интервал температур мартенситных превращений. Нагрев производили электрическим током, а охлаждение за счет естественного остывания образцов на воздухе. Термоциклирование выполняли многократно с тем, чтобы стабилизировать деформацию в цикле. В результате после 20 циклов величина обратимого изменения деформации составляла 0.8% на интервале 20–130 °C (включая термическое удлинение образца) и практически не изменялась от цикла к циклу.



**Рис. 2.** Зависимости деформации от температуры при нагревании образца сплава TiNi в процессе реализации SMART-эффекта (черные значки) и в последующем термоцикле (светлые значки).

Эффект обратимой памяти формы связывают с существованием в предварительно деформированном материале ориентированных внутренних напряжений. Эти напряжения ориентируют элементарные микросдвиги при мартенситных превращениях, способствуя тем самым самопроизвольному обратимому деформированию на макроуровне. В связи с этим становится очевидным, что независимо от природы SMART-эффекта он будет наблюдаться в процессе реализации обратимой памяти формы, поскольку и релаксация внутренних напряжений, и формирование особой дефектной структуры, и вообще любое изменение кинетики фазового перехода должны отражаться на температурной кинетике деформирования.

Обратимся теперь к экспериментальным данным. На рис. 1 для сравнения представлены термодформационные зависимости, полученные в термоцикле через полный интервал мартенситных превращений и в неполном цикле, непосредственно следующем за первым. Как видно из рисунка, в неполном цикле в ходе нагревания превращение было прервано при температуре 79°C и значении деформации 0.25%, после чего материал переводили в мартенситное состояние, охлаждая до ком-

натной температуры. По существу, темными точками на рис. 1 показан НЦПН, необходимый для инициирования SMART-эффекта. Сам эффект наблюдали при последующем нагреве через полный интервал температур превращения (рис. 2, темные точки). На фрагменте зависимости "деформация–температура" отчетливо обнаруживается особенность в виде ступеньки. Начиная с температуры 79°C, изменение деформации прекращается (небольшой наклон линии связан лишь с термическим удлинением образца) и вновь возобновляется лишь после возрастания температуры на 3°C. Как видно из рис. 2, начало задержки деформирования совпадает по температуре с моментом остановки нагрева в НЦПН (79°C). Однако по деформации такого соответствия нет и значение  $\varepsilon = 0.25\%$  достигается лишь в конце ступеньки задержки.

После окончания нагревания образец охлаждали до комнатной температуры и вновь нагревали. Линия, соответствующая повторному нагреву, изображена на рис. 2 светлыми значками и не имеет каких-либо особенностей. Иными словами, SMART-эффект наблюдали однократно лишь в цикле, непосредственно следующим за НЦПН, что соответствует известным данным.

Таким образом, из представленных результатов видно, что SMART-эффект проявляется при реализации обратимой памяти формы в виде задержки деформирования в интервале температур превращения мартенсит → аустенит. С точки зрения использования сплавов с памятью формы наличие сложной температурной кинетики формоизменения после частичных температурных циклов необходимо принимать в расчет прежде всего в устройствах, требующих точного позиционирования подвижных частей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 99–01–00987 и госпрограммы поддержки ведущих научных школ, гранты 96–15–96077 и 96–15–96066.

## Список литературы

- [1] Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: Изд. ЛТУ, 1987. 216 с.
- [2] Материалы с эффектом памяти формы. Справочное изд. / Под ред. В.А. Лихачева. СПб: НИИХ СПбГУ, 1998. Т. 2. 374 с.
- [3] Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Рогачевская М.Ю. Структура и свойства металлических материалов и композиций: Межвуз. сб. / Новгород: НПИ, 1989. С. 44–51.

- [4] *Airoldi G., Carcano G., Riva G.* // J. Physique IV. 1991. V. 1. Coll. 4 (Suppl. J. Physique III, N 11) / Proc. of the European Symposium on Martensitic Transformation and Shape Memory Properties, Sept. 16–18, 1991. Aussois, France. P. 277–282.
- [5] *Airoldi G., Besseghini S., Riva G.* // Proc. of the International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT-92), July 20–24, 1992, Monterey, CA / C.M. Wayman and J. Perkins Eds. Monterey Institute of Advanced Studies, Carmel. 1993. P. 959–964.
- [6] *Airoldi G., Besseghini S., Riva G.* // J. Physique IV. 1995. V. 5. Coll. 2 (Suppl. J. Physique III, N 2) / Proc. of 3<sup>rd</sup> the European Symposium on Martensitic transformations, Sept. 14–16, 1994. Barcelona, Spain. P. 483–488.
- [7] *Riva G., Besseghini S., Airoldi G.* // J. Physique IV. 1995. V. 5. Coll. 8 (Suppl. J. Physique III, N 12). P. 877–882.
- [8] *Airoldi G., Corsi A., Riva G.* // J. Physique IV. 1997. V. 7. Coll. 5 (Suppl. J. Physique III, N 11). P. 513–518.