

## ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ДЛИТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ НА ЭФФЕКТЫ ОДНОКРАТНОЙ И ОБРАТИМОЙ ПАМЯТИ ФОРМЫ В СПЛАВАХ TiNi

Остропико Е.С., Разов А.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: es-ostropiko@mail.ru

Устройства, механизмы, на основе материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), а также широкий потенциал возможных применений, требуют гарантии надежности и стабильности во времени. Однако, вопросу влияния времени на различные функционально-механические свойства материалов с ЭПФ внимания практически не уделяется, за исключением некоторых работ [1-3]. В первую очередь вопрос влияния времени имеет большое значение для рабочих элементов, задействованных в космической технике, так как многие устройства могут не использоваться годами, но при необходимости обязаны гарантированно срабатывать должным образом. Конечно, это касается не только космической техники: необходимо, чтобы любое устройство на основе материала с ЭПФ срабатывало спустя и год и десять лет. В представленной работе рассмотрено влияние времени хранения в мартенситном состоянии предварительно деформированных сплавов TiNi на эффекты однократной и обратимой памяти формы.

Влияние времени на эффект памяти формы исследовали на образцах-свидетелях проволочных ЭПФ-приводов диаметром 2мм из сплава TiNi эквиаомного состава с характеристической температурой  $M_n=66^\circ\text{C}$  изготовленных в 1992 году для трансформируемой фермы «Рапана». Процесс изготовления приводов заключался в термоциклировании через интервал мартенситных превращений под напряжениями 290 МПа при охлаждении и 25 МПа при нагреве. Седьмой цикл охлаждения являлся взведением привода, а седьмой цикл нагрева представлял собой рабочий ход, который должен был осуществиться уже после установки привода в конструкцию при ее развертывании. После изготовления из приводов вырезали части длиной порядка 20мм, которые служили образцами-свидетелями. Образцы-свидетели хранились при комнатной температуре (в мартенситном состоянии) почти 25 лет и были использованы для исследования. На рисунке 1 показаны зависимости эффектов пластичности превращения и памяти формы от номера цикла. Седьмой нагрев, реализующий эффект памяти формы, был проведен в 2016 году. Как видно, почти 25 лет спустя величина эффекта памяти формы никак не деградировала, из чего с достаточной степенью точности можно утверждать, что на величину эффекта памяти формы в сплаве TiNi эквиаомного состава время хранения не влияет.

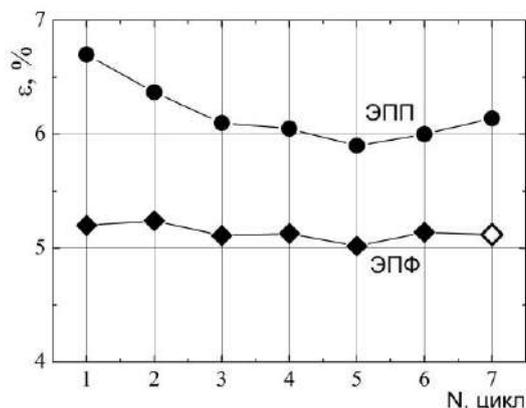


Рисунок 1 – Зависимость величины эффекта пластичности превращения и памяти формы от числа термоциклов. Последний нагрев, реализующий ЭПФ, проведен в 2016 году

В качестве одного из объектов исследования влияния времени на обратимую память формы (ОПФ) были выбраны кольцевые образцы из сплава TiNiCu,  $M_n=65^\circ\text{C}$ ,  $M_k=55^\circ\text{C}$ ,  $A_n=87^\circ\text{C}$ ,  $A_k=98^\circ\text{C}$ . Деформирование образцов производили в 1999 году при комнатной температуре дорнованием бойком диаметром  $d=24,4$  мм.

Таблица 1 – Размеры кольцевых образцов до и после деформирования

№	Высота h до, мм	Ø внутр. до, мм	Ø внешн. до, мм	Высота h после, мм	Ø внутр. после, мм	Ø внешн. после, мм
1.	8,25	22,5	29,9	8,11	24,05	31,2
2.	8,05	22,45	29,9	7,8	24	31,35
3.	7,95	22,5	29,95	7,8	24,05	31,35

После деформирования было проведено шесть циклов нагрева и охлаждения через интервалы температур мартенситных превращений, в пяти из которых был реализован эффект обратимой памяти формы. В 2016 году было проведено аналогичное термоциклирование в том же самом интервале температур (рис.2).

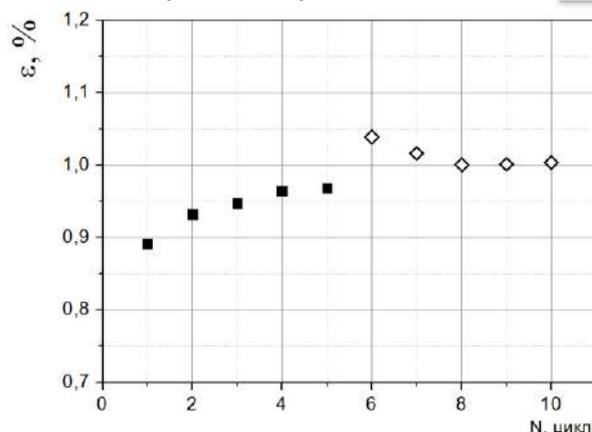


Рисунок 2 – Зависимость величины эффекта обратимой памяти формы от номера цикла  
 ■ – 1999 год, ◇ – 2016 год.

Как видно, после длительного вылеживания наблюдается особенность: эффект обратимой памяти формы увеличивается примерно на 10%. Однако последующее термоциклирование возвращает величину ОПФ на те значения, как если бы никакого длительного хранения образцов в мартенситном состоянии не было.

Кроме кольцевых образцов исследование влияния времени на ОПФ было проведено на цилиндрических образцах из эквиатомного сплава TiNi с температурой  $M_s=74^{\circ}\text{C}$ , высотой и диаметром 5мм. Цилиндры были отожжены при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  в течение часа и продеформированы сжатием при комнатной температуре. В среднем остаточная деформация рассматриваемых образцов после деформирования составляла  $\epsilon_{res}=6,5\%$ . Сразу после деформирования в 1999 году образцы были дважды термоциклированы, таким образом, в образцах был реализован эффект памяти формы и один цикл обратимой памяти формы. Спустя 17 лет каждый образец был подвергнут серии термоциклов через интервал температур мартенситного превращения, но при этом у различных образцов был выбран различный верхний предел температуры цикла. На рисунке 3а приведены зависимости ОПФ от числа термоциклов с верхним пределом  $150^{\circ}\text{C}$ , а на рисунке 3б – с верхним пределом  $230^{\circ}\text{C}$ .

Видно, что в обоих случаях после длительного хранения образцов в мартенситном состоянии наблюдается увеличение эффекта обратимой памяти формы на 25%.

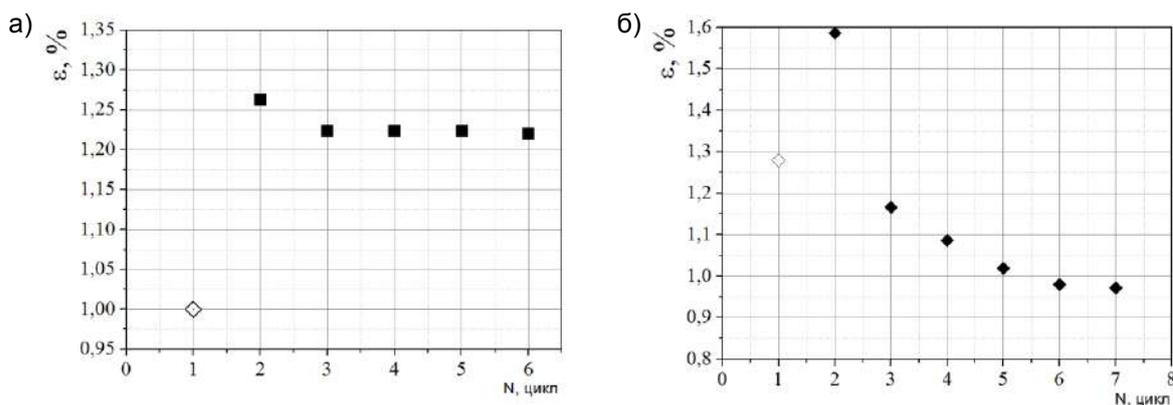


Рисунок 3 – Зависимости обратимой памяти формы от номера термоцикла с верхним пределом 150 (а) и 230°C (б). ◇ – 1999 год, ■ – 2016 год

Последующее термоциклирование до 150°C приводит к небольшому снижению величины ОПФ, по всей видимости, за счет релаксации внутренних напряжений, но она все равно остается больше, чем до хранения и сохраняет свои значения с последующими термоциклами. При первом термоциклировании до 230°C после длительного хранения наблюдается аналогичная ситуация – увеличение эффекта обратимой памяти формы на 25%. Однако, последующее термоциклирование приводит к сильному падению величины ОПФ в результате существенной релаксации внутренних напряжений и возвращает величину ОПФ к предыдущему значению. Последующие термоциклы, так же в результате релаксации напряжений, приводят к снижению величины обратимой памяти формы, но уже менее интенсивно.

В качестве заключения можно констатировать тот факт, что в рассмотренных сплавах TiNi предварительно заданная остаточная деформация спустя много лет хранения в мартенситном состоянии возвращается также, как и до этого хранения. Обратимая память формы, сформированная много лет назад, после длительного хранения в мартенситном состоянии при первом нагреве всегда больше, чем та, которая наблюдалась сразу после деформирования, и при последующем термоциклировании уменьшается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-08-00135а.

#### Список литературы:

1. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. Исследование обратимого эффекта запоминания формы в термически и термомеханически обработанных сплавах на основе Ti-Ni // ФММ.–1994.–Т.78, Вып.1. – С.83-88.
2. Razov A.I. Stability of the shape memory characteristics of Ti-Ni-based and Cu-Zn-Al alloys // Proc. of The International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies SMST-2000, April 30-May 4, 2000, Asilomar Conference Center, Pacific Grove, California, USA / Ed. by S.M.Russel and A.R.Pelton.- 2001. -P.419-424.
3. Хусаинов М.А., Бондарев А.Б., Малухина О.А., Маркина Н.В. Работоспособность сферических сегментов после вылеживания в различных климатических условиях // Вестник Новгородского государственного университета. – 2013. – № 73, Т. 2. – С.120-126.