

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СПЛАВА TiNi С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

¹Глазова Д.И., ¹Беляев С.П., ²Зельдович В.И., ¹Реснина Н.Н., ²Пилюгин В.П.,
²Фролова Н.Ю., ¹Савельева А.Ю.

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: dianka95@gmail.com

В наноструктурированном сплаве TiNi размер зерна значительно влияет на функциональные свойства сплава [1]. Например, с уменьшением размера зерна максимальная величина полностью обратимой деформации возрастает с 2 % до 9 %, а максимальные реактивные напряжения с 400 МПа до 1400 МПа [1]. Одним из наиболее интересных свойств, проявляемых наноструктурированным сплавом TiNi, является способность возвращать в процессе нагрева до 15 % деформации, что превышает кристаллографический ресурс обратимой деформации в сплаве TiNi. Для того, чтобы наблюдать этот эффект, необходимо продеформировать сплав в аустените, затем охладить под нагрузкой, то есть реализовать эффект пластичности превращения, разгрузить и нагреть – реализовать эффект памяти формы [1]. Несмотря на большое количество исследований, посвященных влиянию размера зерна на функциональные свойства сплавов на основе TiNi, данных о влиянии размера зерна на параметры эффектов пластичности превращения и памяти формы не приведены. В связи с этим, целью данной работы явилось изучение влияния размера зерна и напряжения на эффекты пластичности превращения и памяти формы в наноструктурированном сплаве TiNi.

В качестве объекта исследования был выбран сплав Ti–50,2 ат.% Ni. Для получения нанокристаллической структуры исходно крупнокристаллический сплав подвергали аморфизации методом сдвига под давлением 8 ГПа на 3,5 оборота. Из аморфных дисков диаметром 6 мм и толщиной 0,1 мм специальным штампом выбивали образцы в форме лопаток общей длиной 5 мм, с длиной рабочей части 1 мм и шириной 1 мм. Затем образцы нагревали с постоянной скоростью до различных температур, что позволило сформировать в них структуру со средним размером зерна от 20 до 500 нм. Подробнее метод формирования структуры, а также результаты исследования структуры и мартенситных превращений представлены в [2].

Исследование эффектов пластичности превращения и памяти формы проводили в режиме растяжения в испытательной машине Lloyd 30kPlus, оснащенной видеоэкстензометром для измерения деформации и криотермокамерой для деформирования образцов при разных температурах. Образцы нагружали в аустенитном состоянии, затем охлаждали и нагревали в интервале температур от 130 °С до -50 °С под постоянным напряжением от 100 до 600 МПа. При необходимости температуру нагрева повышали до 200 °С. Затем цикл повторяли при большем значении напряжения.

На рисунке 1 представлены зависимости деформации от напряжения, полученные при охлаждении и нагревании под разными нагрузками образцов со средним размером зерна 500 нм (рис.1,а) и 130 нм (рис.1,б). Видно, что в образце со средним размером зерна 500 нм изменение деформации при охлаждении под нагрузкой (реализация эффекта пластичности превращения) происходит в один этап, тогда как в образце со средним размером зерна 130 нм этот процесс происходит в один или два этапа в зависимости от нагрузки. Многоэтапное изменение деформации наблюдается также в образцах с размером зерна менее 130 нм. Каждый из этапов изменения деформации связан с реализацией различных типов мартенситных переходов: B2→R, R→B19' или B2→B19'. В образцах с размером зерна менее 130 нм при малых нагрузках интервалы температур, в которых протекает каждое из этих трех превращений, не пересекаются, поэтому можно наблюдать накопление деформации, связанное с каждым переходом отдельно. С увеличением нагрузки температуры перехода B2→B19' возрастают интенсивнее, чем температуры переходов B2→R и R→B19', поэтому при высоких нагрузках наблюдается только один этап.

Восстановление деформации в процессе нагрева (реализация величины эффекта памяти формы) во всех образцах и при всех нагрузках происходит в один этап.

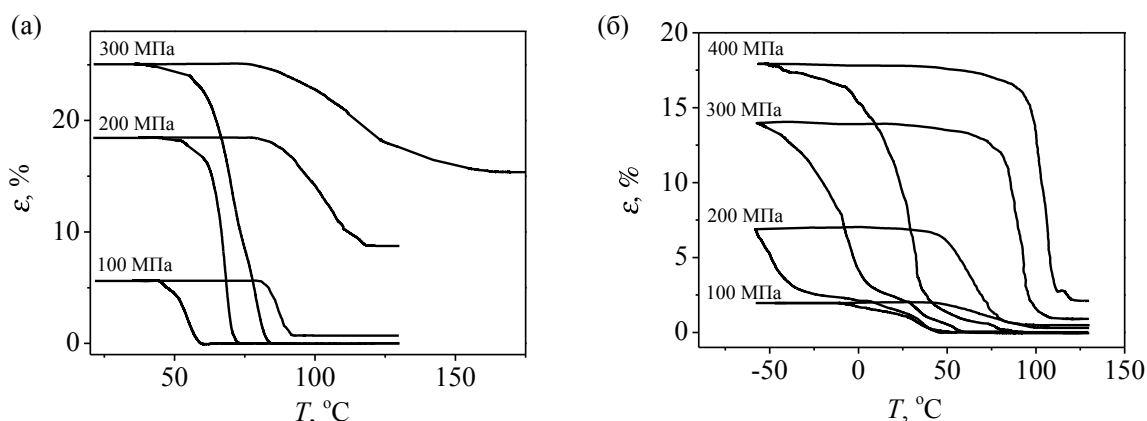


Рисунок 1 – Зависимости деформации от температуры, полученные при охлаждении и нагревании под разными нагрузками образцов со средним размером зерна 500 нм (а) и 130 нм (б)

Установлено, что в образце со средним размером зерна 500 нм при нагрузках выше 100 МПа большой вклад в величину пластичности превращения вносит пластическая деформация. С уменьшением размера зерна пластическое деформирование подавляется, и необратимая деформация в цикле, равная разнице между величинами пластичности превращения и памяти формы, существенно уменьшается (рис. 1).

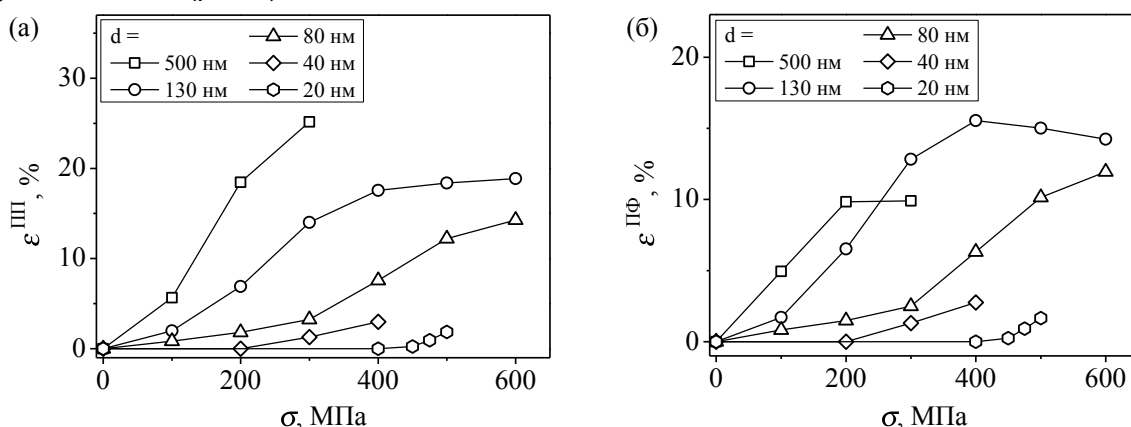


Рисунок 2 – Зависимости величин эффекта пластичности превращения (а) и эффекта памяти формы (б) от напряжения, полученные при охлаждении и нагревании под нагрузкой образцов с различным размером зерна

На рисунке 2 представлены зависимости величин эффекта пластичности превращения (рис.2,а) и эффекта памяти формы (рис.2,б) от напряжения, действующего при охлаждении и нагревании, полученные в образцах с различным размером зерна. Видно, что в образцах со средним размером зерна 80 нм и выше величины эффектов пластичности превращения и памяти формы отличны от нуля при всех нагрузках, тогда как в образцах с размером зерна менее 80 нм при нагрузках, не превышающих некоторое пороговое значение, эффекты пластичности превращения и памяти формы не наблюдаются. В образце с размером зерна 40 нм пороговая нагрузка составляет 200 МПа, а в образце с размером зерна 20 нм—400 МПа. Известно, что эффект пластичности превращения связан с тем, что при охлаждении сплава через интервал прямого превращения под нагрузкой преимущественным образом зарождаются варианты мартенсита, сопровождающиеся сдвигом сонаправленным с нагрузкой, что приводит к изменению макроскопической деформации. Наличие пороговой нагрузки говорит о том, что в образцах с размером зерна менее 80 нм существует некоторая минимальная нагрузка, необходимая для появления

ориентированных кристаллов, и она тем больше, чем меньше размер зерна. Вероятно, это связано с тем, что с уменьшением размера зерна затрудняется образование ориентированного мартенсита, и в зернах по размеру близких к критическому наблюдается только одна мартенситная пластина, состоящая из двух сдвойникованных вариантов мартенсита [3].

Установлено, что величины эффектов пластичности превращения и памяти формы возрастают с увеличением размера зерна. При этом в образцах с размером зерна более 80 нм обратимая деформация достигает своего максимума при некоторой нагрузке и при дальнейшем увеличении нагрузки не меняется. В образце с размером зерна 500 нм максимум достигается при нагрузке 200 МПа, а в образце с размером зерна 130 нм – при нагрузке 400 МПа. В образцах с размером зерна менее 80 нм обратимая деформация своего максимума не достигает и возрастает вплоть до разрушения образцов.

Показано, что величина эффекта памяти формы от размера зерна зависит немонотонно, максимум обратимой деформации 15,5 % наблюдается в образце со средним размером зерна 130 нм. Причины столь большого значения обратимой деформации, практически в 1,5 раза превышающего кристаллографический ресурс превращения в сплаве TiNi, неизвестны и для их выяснения требуется провести дополнительные исследования. Стоит заметить, что полученная в настоящей работе максимальная величина обратимой деформации 15,5 % хорошо согласуется с данными, представленными в работе [1].

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

1. В образцах с размером зерна 130 нм и менее изменение деформации при охлаждении происходит поэтапно, что позволяет регулировать величины и температуры реализации эффектов пластичности превращения и памяти формы.

2. С уменьшением размера зерна проявление эффектов пластичности превращения и памяти формы затрудняется. При размере зерна менее 80 нм для реализации этих эффектов необходимо приложить нагрузку выше пороговой, и чем меньше размер зерна, тем выше эта пороговая нагрузка.

3. Величина эффекта пластичности превращения возрастает с увеличением размера зерна, тогда как величина эффекта памяти формы от размера зерна зависит немонотонно. Наилучшие свойства проявляет образец с размером зерна 130 нм.

Список литературы:

1. Khmelevskaya I., Prokoshkin S., Brailovski V., Inaekyan K., Demers V., Gurtovaya I., Korotitskiy A., Dobatkin S. – *Advanced in Science and Technology*. 59 (2008) 156-161.
2. Resnina N., Belyaev S., Zeldovich V., Pilyugin V., Frolova N., Glazova D. – *Thermochimica Acta*. 627 (2016) 20-30.
3. T. Waitz, T. Antretter, F. D. Fischer, H. P. Karnthaler. – *Materials Science and Technology*. 24 (2008) 934-940.