

ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ ФОРМЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКИХ ЛЕНТ СПЛАВОВ Ti-Ni-Cu, Ti-Hf-Ni-Cu

Беляев С. П.¹, Реснина Н. Н.¹, Слесаренко В. Ю.¹, Шеляков А. В.²

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

² Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

2sl@inbox.ru

Для применения необычных свойств сплавов с памятью формы в микроэлектронике и микротехнике необходимо использование образцов, обладающих малыми размерами в трех измерениях. Изготовление таких объектов из массивных образцов является трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому все большую актуальность приобретает использование тонких лент, полученных закалкой из расплава. Однако основная трудность заключается в том, что структура полученных тонких лент является аморфной, а, следовательно, необычные деформационные эффекты отсутствуют, поэтому необходимо эти объекты подвергнуть кристаллизации для того чтобы сформировать в них кристаллическую структуру. Кинетика мартенситных превращений и эффекты памяти формы в полностью кристаллических тонких лентах на основе сплава TiNi хорошо изучены. Однако процесс кристаллизации можно прерывать на любом этапе, что позволяет получать частично кристаллизованные тонкие ленты, физические и механические свойства которых будут определяться соотношением объемных долей аморфной и кристаллической фаз. Целью работы явилось исследование механических свойств и деформационных эффектов в аморфно-кристаллических тонких лентах на основе сплава TiNi, отличающихся типом мартенситного перехода, происходящего в кристаллической фазе.

В качестве объектов исследования были выбраны аморфные тонкие ленты сплавов Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅ и Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu₅, полученные методом быстрой закалки из расплава. Образцы размером 5 x 2 x 0.04 мм, с различной долей кристаллической фазы от 0 до 100 %, изгибали при постоянной температуре, при которой сплавы находились в мартенситном состоянии, между плоскопараллельными пластинами, в специально разработанной установке. Сплав Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅ находится в мартенситном состоянии при температурах ниже 331 К, поэтому деформирование осуществляли при температуре 293 К. Сплав Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu₅ находится в мартенситном состоянии при температуре ниже 204 К, поэтому его деформировали при температуре 77 К. После этого образцы разгружали, нагревали через интервал обратного мартенситного превращения и охлаждали через интервал прямого мартенситного превращения. Далее образцы деформировали до большего значения деформации и повторяли всю описанную процедуру. На каждом этапе образцы фотографировали на фоне масштабной подложки. Полученные изображения оцифровывали, определяли радиус вписанной окружности и вычисляли деформации.

Полученные результаты показали, что в обоих сплавах в полностью аморфных образцах деформирование происходит в два этапа. При заданных деформациях ниже предела текучести материал деформируется упруго, при более высоких напряжениях деформирование осуществляется пластически. Следует отметить, что поскольку для сплава Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu₅ предел текучести гораздо выше, чем для сплава Ti₅₀Ni₂₅Cu₂₅, то и максимальная возвращаемая на упругом участке деформация также выше. Независимо от состава сплава при увеличении объемной доли кристаллической фазы даже небольшие воздействия приводят к образованию неупругой деформации за счет переориентации мартенситных доменов в кристаллической фазе.

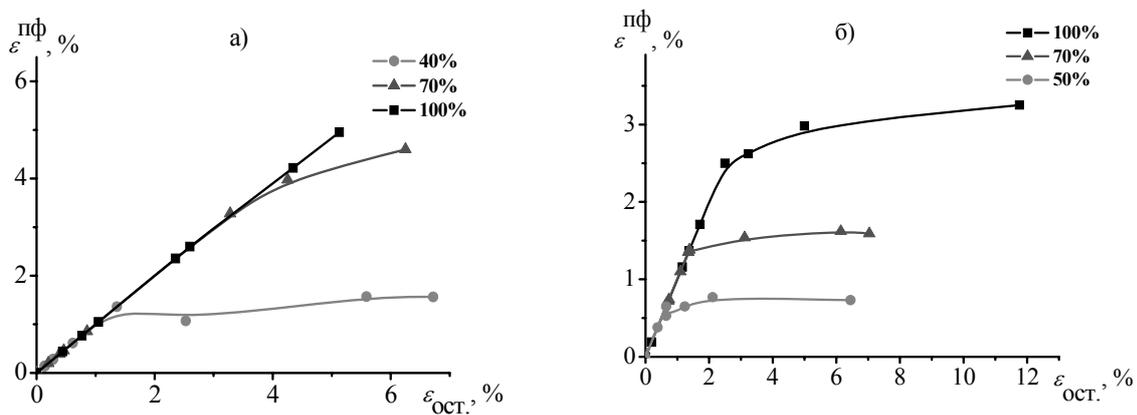


Рис. 1. Зависимость величины эффекта памяти формы от остаточной деформации и доли кристаллической фазы для сплавов $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ (а) и $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ (б)

На рис. 1 представлены зависимости величины эффекта памяти формы от величины заданной деформации и доли кристаллической фазы. Видно, что в аморфно-кристаллических сплавах при величине заданной деформации ниже значения ε^{kp} , зависящего от типа фазового перехода, а также от объемной доли кристаллической фазы в сплаве, вся заданная деформация возвращается за счет реализации эффекта памяти формы. Следует отметить, что величина ε^{kp} для сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ выше, чем у сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ более чем в два раза. Это позволяет сделать заключение о том, что переход $B2 \leftrightarrow B19'$ сопровождается большей величиной формовосстановления по сравнению с переходом $B2 \leftrightarrow B19$. Независимо от типа мартенситного перехода при деформировании в сплавах механизмы деформации сменяют друг друга одинаковым образом. На первом этапе происходит деформирование кристаллической фазы за счет переориентации мартенситных кристаллов. На втором этапе – пластическое деформирование аморфной фазы. Причем, этот процесс начинается еще до того, как ресурс обратимого механизма – переориентации мартенситных доменов будет исчерпан. Поэтому накопление необратимой деформации при превышении ε^{kp} обусловлено деформированием аморфной фазы. После исчерпания деформационного ресурса (максимальной восстанавливаемой деформации), на третьем этапе, начинается пластическая деформация кристаллической фазы. В разных сплавах различаются лишь величины остаточных деформаций, при которых начинается тот или иной этап. Например, в аморфно-кристаллическом сплаве $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, содержащем 70% кристаллической фазы, аморфная фаза начинает пластически деформироваться при остаточной деформации 1,5%, а в сплаве $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$, содержащем ту же долю кристаллической фазы, при заданной деформации 4 %.

В отличие от образцов сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, в которых эффект обратимой памяти формы не был обнаружен, в аморфно-кристаллических лентах сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ при охлаждении наблюдается самопроизвольное деформирование. На рис. 2 представлены зависимости величины эффекта обратимой памяти формы от остаточной деформации для аморфно-кристаллических образцов сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ с различной объемной долей кристаллической фазы. Видно, что в полностью кристаллическом образце эффект обратимой памяти формы вовсе не наблюдается, а для образцов, содержащих 40% и 70%, напротив, обнаружено самопроизвольное деформирование, причем зависимость величины эффекта обратимой памяти формы от остаточной деформации является немонотонной. Это указывает на то, что при некотором соотношении аморфной и кристаллической фаз в сплаве создаются благоприятные условия для проявления максимального эффекта обратимой памяти формы.

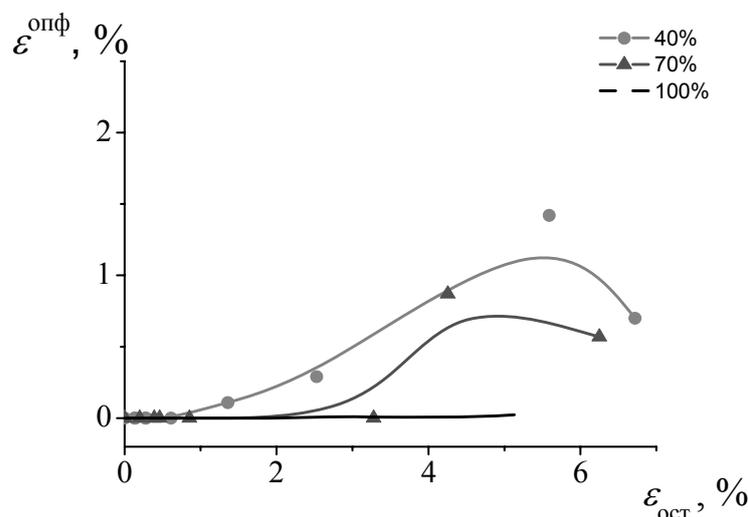


Рис. 2. Зависимость величины эффекта обратимой памяти форм от остаточной деформации в образцах сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ с объемной долей кристаллической фазы 40%, 70% и 100%.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДВОЙНИКОВ С ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫМИ ЗОНАМИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЦИНКА

Башмаков В. И., Чикова Т. С., Ховатов П. А., Гей С. Л.

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь
t.chikova@grsu.by

В [1, 2] отмечалось, что деформационные двойники, зарождающиеся при микроиндентировании кристаллов пирамидкой Виккерса, приводят к искажению формы отпечатков микротвердости. В [1] просто констатируется, что наличие двойников вызывает «причудливость формы отпечатка». В [2] в экспериментах использовались такие нагрузки, при которых у отпечатка одновременно возникало 10-12 клиновидных двойников, развивающихся в пересекающихся плоскостях. Определить результирующее влияние такого количества двойников на форму отпечатка крайне трудно.

Наиболее результативным подходом к изучению формирования упруго-пластической зоны, создаваемой алмазной пирамидкой Виккерса при зарождении и развитии деформационных двойников, является использование концентрированной нагрузки, что учитывает особенности зарождения и развития деформационных двойников. Деформирование монокристаллов проводилось путем микроиндентирования плоскости (0001) монокристаллов цинка алмазной пирамидкой Виккерса на автоматическом микротвердомере НВММТ-Х7 (Япония).

Квадратная в сечении параллельном поверхности кристалла пирамидка и гексагональная решетка образца не имеют общей оси симметрии, поэтому при любой их взаимной ориентации должна проявляться анизотропия деформации по плоскостям базиса (0001) $\langle 1120 \rangle$, пирамиды $\{1122\} \langle 1123 \rangle$ и призмы $\{1012\} \langle 1120 \rangle$, что хорошо известно [1]. В работе изучено взаимодействие механических двойников, возникающих у отпечатка, с отпечатком как упруго-пластической зоной, созданной скольжением по указанным плоскостям.