

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ

ЛЕНТ $\text{Ni}_{57}\text{Mn}_{21}\text{Al}_{21}\text{Si}_1$

Бармина Е.С.¹, Лянге М.В.¹, Горшенков М.В.¹, Ховайло В.В.¹, Коледов В.В.²,

Кучин Д.С.², Калимуллина Э.Т.², Чаттерджи Р.³

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

³Индийский Институт Технологии Дели, Нью-Дели, Индия

katrinbarmina@gmail.com

Стремление к созданию миниатюризованных, быстродействующих и экономичных устройств приводит к необходимости исследования тонкомерных металлических лент и пленок. За счет протекания термоупругого мартенситного превращения в интерметаллидах проявляются такие функциональные свойства как эффект памяти формы, вызванный магнитным полем, температурой или нагрузкой, двухсторонний эффект памяти формы, сверхупругость, большие обратимые деформации¹. В настоящее время практическое применение нашли сплавы на основе никелид титана² и некоторые представители сплавов с памятью формы на основе Cu. Мартенситное превращение наблюдается в некоторых сплавах Гейслера, таких как Ni-Mn-X (X = Al, Ga, In, Sn, Sb). Таким образом, представляется интересным исследовать функциональные свойства этих сплавов, которые могут в последующем найти практические применения.

Настоящая работа посвящена исследованию термомеханических и структурных свойств, особенностей фазового перехода в быстрозакаленных лентах $\text{Ni}_{57}\text{Mn}_{21}\text{Al}_{21}\text{Si}_1$. Исходными компонентами при получении лент методом спиннингования служили высокочистые металлы (99,99, ат.%). Полученные ленточные образцы имели характерные размеры толщиной около 18 мкм, длиной до 3 см, шириной около 0,8 мм

Электронно-микроскопические исследования на просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения JEM1400 и растровом электронном микроскопе JSM-6610 установили, что при комнатной температуре образцы находятся в мартенситном состоянии. Присутствующие на электронограмме сверхструктурные отражения 001 и 110 свидетельствуют, что мартенситная фаза является упорядоченной по типу L1₀. Микроструктура полностью состоит из мелкодисперсных зёрен размером около 2 мкм, содержащих один пакет нанодвойников. Межзёренные границы имеют округло-

ступенчатую форму. Рентгеноструктурный анализ, проведенный на дифрактометре Rigaku Ultima IV с излучением Co-K α при температуре 298К, подтвердил электронографические данные – образцы являются практически однофазными с L1₀ структурой. Пространственная группа P4/mmm, параметры решетки a=0,384нм, c=0,329 нм, их отношением c/a=0,865. Однако, обнаружена небольшая часть B2аустенитной фазы, что объясняет расщепление линии на дифрактограмме при угле 2 Θ =52° на две: (111)_{L10} и (202)_{B2}.

По данным дифференциальной сканирующей калориметрии характеристические температуры начала и конца прямого и обратного мартенситного превращения $M_s = 391$ К, $M_f = 359$ К, $A_s = 376$ К, $A_f = 408$ К. Равновесная температура, определяемая как $T_0 = (M_s + A_f)/2$, равна 400 К.

При изучении фазовых переходов важную информацию дает анализ температурных зависимостей физических свойств. Поэтому были исследованы термомеханические свойства. Зависимости изгибной деформации от температуры, $\epsilon = f(T)$, были сняты при термоциклировании образцов под нагрузкой. Результаты этих измерений показаны на рисунке 1. Полученные зависимости свидетельствуют, что сплав способен проявлять обратимые деформации $\Delta\epsilon$, определяемые как высота петли гистерезиса, до 0,2 %. Причем, с увеличением нагрузки обратимые деформации увеличиваются, а характеристические температуры сдвигаются в область более высоких температур.

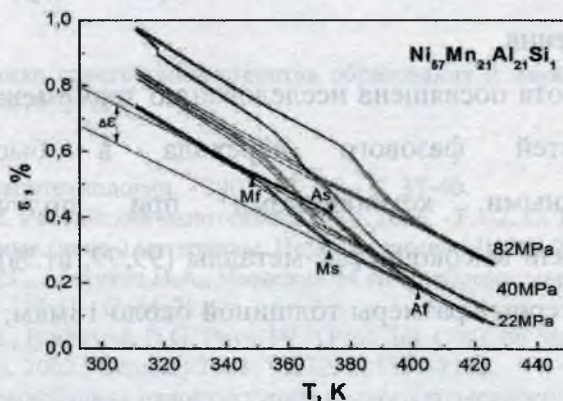


Рисунок 1. Зависимость изгибной деформации от напряжения

В сплавах обнаружен не только односторонний, но и двухсторонний эффект памяти формы. Исследование двухстороннего эффекта проводилась *in situ* на оптической установке, позволяющей фиксировать поведение образца во времени в аустенитном и мартенситном состоянии. Ленте придавалась деформация изгибом при комнатной температуре в мартенситном состоянии; при нагреве, за счет протекания

обратного мартенситного превращения, лента начинала восстанавливать исходную форму и выше температуры A_s полностью её восстанавливала. При последующем охлаждении образец стремился к восстановлению деформированной формы. Было проведено термоциклирование ленты 1000 раз. По результатам получена зависимость обратимой изгибной деформации от количества термоциклов, которая изображена на рисунке 2. Обратимые деформации в образце достигают 0,4% – 0,7%. С числом термоциклов температура перехода не изменяется, а величина эффекта незначительно понижается. Вероятно, что причиной двухстороннего эффекта памяти формы в лентах $Ni_{57}Mn_{21}Al_{21}Si_1$ при протекании термоупругого мартенситного превращения является образование дефектов решетки, по-видимому дислокаций, которые создаются на некоторых участках образца при термоциклировании, т.е. при перестройке решетки из высокотемпературной кубической в низкотемпературную тетрагональную и обратно. Матрицы дислокаций не исчезают при обратном превращении, а наследуются решеткой аустенитной фазы³, создавая в объеме образца поле внутренних напряжений. Деформируясь в этом поле напряжений при структурном переходе, образец многократно обратимо меняет свою форму.

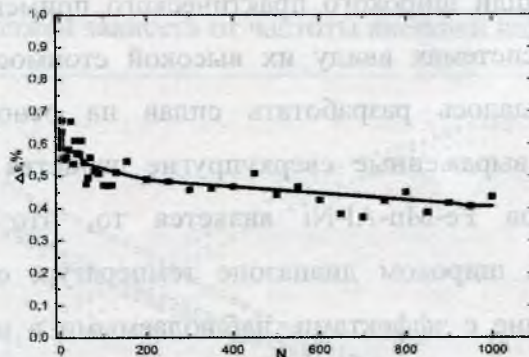


Рисунок 2. Зависимость обратимой деформации от количества термоциклов

В образцах обнаружен и исследован односторонний и двухсторонний эффекты памяти формы. Полученные данные демонстрируют перспективу применения сплава $Ni_{57}Mn_{21}Al_{21}Si_1$ для создания миниатюрных датчиков и актуаторов.

1. Otsuka K., Wayman C.M. Shape memory materials. - Cambridge University Press, 2002
2. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения В.Э. Гюнтер, В.Н. Ходоренко и др. - Томск: Изд-во МИЦ, 2006
3. Хунджуа А.Г. Эффект памяти формы и сверхупругость. - М.: МГУ, 2010.