МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Сборник материалов XVI Российской научной студенческой конференции

Томск, 17–20 апреля 2018 г.

ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Функциональные свойства [001]-монокристаллов сплава $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$, состаренных под нагрузкой в мартенситном состоянии*

Э.И. Янушоните, А.С. Ефтифеева

Томский государственный университет, г. Томск

Ферромагнитный сплав CoNiAl испытывает термоупругое $B2$–$L1_0$-мартенситное превращение (МП). При охлаждении под действием напряжений наблюдается прямое МП, при нагреве – обратное МП. В результате материал испытывает обратимую деформацию и реализуется эффект памяти формы (ЭПФ). Подобно внешним напряжениям, в материале можно создать внутренние дальнодействующие напряжения, которые способствуют наблюдению обратимой деформации при охлаждении/нагреве без внешних напряжений. За счет появления внутренних полей в материале реализуются двусторонний ЭПФ (ДЭПФ), а также в дальнейшем возможно наведение магнито-индуцированной деформации [1, 2].

В работе [3] на монокристаллах CoNiAl показана возможность наведения ДЭПФ с высокой циклической стабильностью за счет старения в мартенситном состоянии под нагрузкой, прикладываемой вдоль [001]-направления. Целью данного исследования является изучение функциональных свойств монокристаллов ферромагнитного сплава $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$, с осью деформации вдоль [001]-направления, после старения в мартенситном состоянии под нагрузкой, приложенной вдоль [110]-направления.

Исследуемые монокристаллы ферромагнитного сплава $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ (ат.%) выращены методом Бриджмена. Форма исследуемых образцов – параллелепипеды с площадью поперечного сечения $S = 9$ мм^2 и высотой $L = 6$ мм. Предварительно гомогенизированные при 1623 К, 8,5 ч и закаленные в воду образцы подвергали старению под нагрузкой в мартенсите – образец выдерживали при 423 К в течение 0,5 ч в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой 500 МПа вдоль [110]-направления. Далее проводили исследование функциональных свойств вдоль [001]-направления.

Установлено, что старение создает условия для наведения ДЭПФ – при минимальном внешнем напряжении $\sigma_{вн} = 4$ МПа образец обратимо увеличивается вдоль [001]-направления при охлаждении и восстанавливает исходную форму при нагреве. На рис. 1 показан результат исследования ДЭПФ в состаренных монокристаллах – кривая деформации от температуры $\varepsilon(T)$. Видно, что на кривой наблюдается несколько стадий. МП на первой стадии

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00179.

имеет скачкообразный, взрывоподобный характер, т.е. температуры начала и конца превращения равны и соответственно имеют значения $M_{s1} = M_{f1} = 393$ К и $A_{s1} = A_{f1} = 408$ К. При охлаждении на первой стадии наблюдается обратимая деформация $\varepsilon_{ДЭПФ1} = 1{,}7$ % и узкий температурный гистерезис $\Delta T = 15$ К. Далее скорость превращения резко уменьшается и МП на второй стадии развивается в широком температурном интервале около 100 К с $\varepsilon_{ДЭПФ2} = 3{,}4$ % и сохраняется узкий гистерезис $\Delta T = 14$ К. Затем следует другой «взрыв» – третья стадия. Превращение на третьей стадии реализуется при температурах $M_{s3} = M_{f3} = 259$ К и $A_{s3} = A_{f3} = 297$ К, значение обратимой деформации составляет $\varepsilon_{ДЭПФ3} = 1{,}1$ %, а температурный гистерезис расширяется более чем в 2 раза – $\Delta T = 37$ К по сравнению с первой и второй стадиями. Суммарная обратимая деформация ДЭПФ на трех стадиях равна $\varepsilon_{ДЭПФ} = 6{,}2$ %.

ДЭПФ наблюдается за счет создания внутренних растягивающих полей напряжений вдоль [001]-направления при старении в мартенсите под сжимающей нагрузкой вдоль [110]-направления, которое приводит к стабилизации одного преимущественного варианта мартенсита.

Экспериментально показано, что при $A_{f3} < T = 343$ К $< M_{f1}$ в состаренных кристаллах наблюдается неупругая обратимая деформация при нагрузке/разгрузке сжатием. Зависимость напряжений от деформации $\sigma(\varepsilon)$ при $T = 343$ К представлена на рис. 2. Критические напряжения равны $\sigma_{кр} = 70$ МПа и не зависят от деформации заданной в цикле нагрузка/разгрузка. Величина обратимой деформации, механический гистерезис и соответственно вид кривой $\sigma(\varepsilon)$ определяются заданной деформацией. При данной температуре испытания максимальная обратимая деформация равна $\varepsilon_{обр} = 2{,}2$ % и минимальный механический гистерезис – $\Delta\sigma = 10$ МПа.

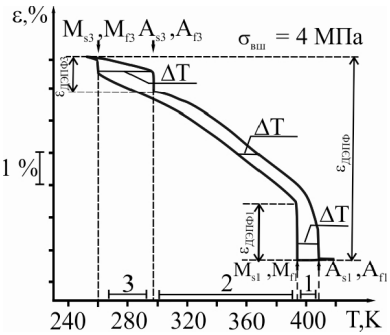

Рис. 1. Кривая $\varepsilon(T)$ при охлаждении/нагреве под действием внешней нагрузки $\sigma_{вн} = 4$ МПа

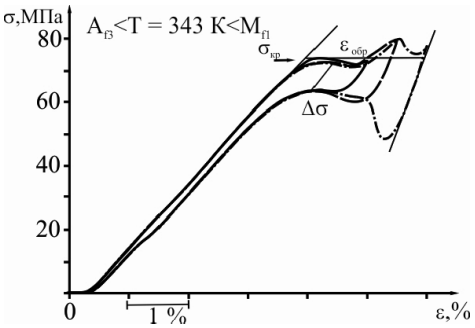

Рис. 2. Кривые $\sigma(\varepsilon)$ при $T = 343$ К в циклах нагрузка/разгрузка сжатием для состаренных в мартенсите монокристаллов $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ с осью деформации вдоль [001]-направления

При температуре испытания $A_{f3} < T < M_{f1}$ образец до приложения сжимающей нагрузки находится в двухфазном $(B2 + L1_0)$-состоянии. Поэтому появление неупругой обратимой деформация связано:

- либо с переориентацией варианта мартенсита, образовавшегося на первой стадии под противодействующими внутренними растягивающими напряжениями;
- либо с образованием мартенсита в объеме материала, который не испытал прямое МП на первой стадии, и его исчезновением в отсутствие внешних напряжений [1, 2].

Автор выражает благодарность своим научным руководителям д.ф.-м.н. Е.Ю. Панченко и д.ф.-м.н., проф. Ю.И. Чумлякову за совместное обсуждение и анализ полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мартенситные* превращения / под ред. В.А. Лободюка, Э.И Эстрина. – М.: Физматлит, 2009. – 352 с.
2. *Медицинские* материалы и имплантаты с памятью формы / под ред. В.Э. Гюнтера. – Томск: Изд-во МИЦ, 2011. – Т. 1. – 534 с.
3. *Eftifeeva A.*, *Panchenko E.*, *Chumlyakov Y.*, *et al.* Two-way shape memory effect in [001]*B*2-oriented Co-Ni-Al single Crystals // Materials Today: Proceedings. – 2017. – V. 4. – P. 4789–4796.
4. *Niendorf T.*, *Krooss P.*, *Somsen C.* Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys // Acta Mater. – 2015. – V. 89. – P. 298–304.

Yanushonite E.I., Eftifeeva A.S. The function properties of stress-induced aged in martensite $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ single crystals oriented along the [001]-direction

Янушоните Элеонора Ионовна, студентка; yanushonite98@mail.ru;
Ефтифеева Анна Сергеевна, аспирантка; anna_eftifeeva@rambler.ru