ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/240

ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ НА ДВУСТОРОННИЙ ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$

Ефтифеева А.С., Янушоните Э.Я., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.
НИ Томский государственный университет, Томск, Россия

Обратимую деформацию в сплаве с памятью формы можно реализовать при охлаждении/нагреве в свободном состоянии, если в материале созданы внутренние дальнотействующие поля напряжений. Этот эффект называется двусторонний эффект памяти формы (ДЭПФ) и его можно получить за счет старения под нагрузкой в аустенитном/мартенситном состояниях или термоциклирования через температурный интервал мартенситных превращений (МП) под нагрузкой [1]. Для широкого коммерческого использования необходимо реализовать ДЭПФ в материале с высокой величиной обратимой деформации близкой к теоретически рассчитанной и температурами МП вблизи комнатной. Поэтому цель данной работы выяснить влияние старения под нагрузкой в аустенитном и мартенситном состояниях на обратимую деформацию, температуры МП и температурный гистерезис при проявлении ДЭПФ в монокристаллах перспективного ферромагнитного сплава $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$, испытывающего термоупругое B2-L1₀ МП.

Монокристаллы выращивали методом Бриджмена. Образцы гомогенизировали 8,5 ч при 1613 К и затем закаливали в воду комнатной температуры. Далее проводили старение при температуре $T_{\text{исп}}$ в течение времени t под сжимающей нагрузкой $\sigma_{\text{ст}}$, приложенной вдоль [110]_{B2}-направления в различных состояниях: в аустенитном состоянии ($\sigma_{\text{ст}}=100$ МПа, $T_{\text{исп}}=673$ К, $t=0,5$ ч) и в мартенситном состоянии ($\sigma_{\text{ст}}=500$ МПа, $T_{\text{исп}}=423$ К, $t=1,0$ ч). ДЭПФ измеряли вдоль [001]_{B2}-направления, перпендикулярно направлению старения.

В закаленных образцах при охлаждении/нагреве в свободном состоянии образуется самоаккомодирующая структура и макроскопическая деформация не наблюдается. За счет старения под нагрузкой в материале созданы внутренние напряжения, которые приводят к росту преимущественного варианта мартенсита при охлаждении. В состаренных в аустените и мартенсите кристаллах физические причины появления дальнотействующих полей напряжений различны. Старение в аустените создает в монокристаллах вдоль [001]_{B2}-направления растягивающие внутренние напряжения величиной $\sigma_G=25$ МПа, которые генерируются ориентированным ростом частиц ϵ -Co [2]. Частицы являются неравноосными и вытянутыми вдоль направления типа $\langle 111 \rangle_{B2}$ (длина вдоль $\langle 111 \rangle_{B2}$ ~20 нм). Тогда как старение в мартенсите создает в материале растягивающие внутренние напряжения вдоль [001]_{B2}-направления равные $\sigma_G=65$ МПа за счет стабилизации L1₀-мартенсита [3]. Стабилизация мартенсита может включать атомную переориентацию ближнего порядка, перераспределение точечных дефектов в соответствии с симметрией мартенсита, изменение структуры антифазных границ и антифазных доменов, образовавшихся при закалке в аустените, и закрепление дефектами двойниковых границ в мартенсите [4]. Выделение каких-либо частиц вторичных фаз в состаренных в мартенсите кристаллах не обнаружено.

На рисунке 1 представлены кривые деформации от температуры $\epsilon(T)$ при охлаждении/нагреве в свободном состоянии для [001]_{B2}-монокристаллов, состаренных в аустените и мартенсите. В исследуемых образцах вдоль [001]_{B2}-направления наблюдается растягивающий ДЭПФ, однако вид кривых определяется режимом термомеханической обработки.

ДЭПФ после старения в аустените характеризуется величиной обратимой деформации 2,2 %, «размытыми» интервалами прямого и обратного превращений $\Delta_1=133$ К и $\Delta_2=167$ К и высоким рассеянием энергии, что описывает температурный гистерезис $\Delta T=101$ К (первый цикл на рис. 1, а). Старение в мартенсите приводит к обратимой деформации $\epsilon_{\text{ДЭПФ}}=7,3$ % в 3,3 раза большей и температурному гистерезису $\Delta T=50$ К в 2 раза меньшему, по сравнению с состаренными в аустените монокристаллами. В состаренных в мартенсите кристаллах

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

увеличиваются температуры МП, например, температура M_s сдвигается в область высоких температур на 70 К и равна $M_s=280$ К, относительно состаренных в аустените (первый цикл на рис. 1, б). Также, в состаренных в мартенситах кристаллах прямое и обратное МП наблюдаются в более узких температурных интервалах $\Delta T_1=93$ К и $\Delta T_2=80$ К и появление большой доли мартенсита при M_s ($\varepsilon_{tr}=0,67 \cdot \varepsilon_{ДЭПФ}$) происходит с «взрывным» характером в очень узком температурном интервале.

Рис. 1. Кривые $\varepsilon(T)$ при охлаждении/нагреве в свободном состоянии для монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$, состаренных под нагрузкой в аустените (а) и в мартенситах (б)

Рис. 2. Зависимости $\varepsilon_{ДЭПФ}(n)$, $M_s(n)$ и $\Delta T(n)$ для монокристаллов $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$

Обратимая деформация $\varepsilon_{ДЭПФ}$ $[001]_{B2}$ -монокристаллов, состаренных в мартенситах, составляет $\varepsilon_{ДЭПФ}=0,81 \cdot \varepsilon_0$ ($\varepsilon_0=9,0$ % теоретически рассчитанная деформация для $B2-L1_0$ превращения при растяжении). Тогда как в состаренных в аустените кристаллах $\varepsilon_{ДЭПФ}=0,24 \cdot \varepsilon_0$. Это вызвано, во-первых, меньшей величиной внутренних напряжений в состаренных в аустените кристаллах. Во-вторых, уменьшением объемной доли $B2$ -матрицы, испытывающей $B2-L1_0$ МП, за счет выделения

при старении в аустените дисперсных частиц объемной долей $f=20$ %, деформирующихся только упруго при развитии МП.

Была исследована циклическая стабильность ДЭПФ в зависимости от количества термоциклов n . Результаты представлены на рисунке 2. Показано, что в монокристаллах, состаренных в аустените, с ростом n увеличивается обратимая деформация и температура, однако расширяется температурный гистерезис, что приводит к разрушению образцов после $n=30$ циклов. Монокристаллы, состаренные в мартенситах, выдерживают $n=100$ циклов без деградации свойств и разрушения (рис. 2).

Экспериментально показано, что старение под нагрузкой в мартенситном состоянии – это эффективный способ для наведения ДЭПФ с обратимой деформацией близкой к теоретическому ресурсу при МП и температурами МП вблизи комнатной в монокристаллах сплава CoNiAl .

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

Литература

1. Otsuka K., Wayman C. M. Shape memory materials // Cambridge University PRESS. 1998. 284p.
2. Eftifeeva A., Panchenko E., Chumlyakov Y., Maier H. J. Investigation of the two-way shape memory effect in $[001]$ -oriented $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ single crystals // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1698. P. 030002.
3. Panchenko E., Eftifeeva A., Chumlyakov Y., Gerstein G., Maier H.J. Two-way shape memory effect and thermal cycling stability in $\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Al}_{30}$ single crystals by low-temperature martensite ageing // Scr. Mater. V. 150, 2018. P. 18–21.
4. Otsuka K., Ren X. Mechanism of martensite aging effects and new aspects // Mater. Sci. Eng., A. 2001. V. 312. P. 207–218.