

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XV РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

18–20 мая 2016 г., г. Томск, Россия

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2016

Влияние времени старения на сверхэластичность в монокристаллах сплава FeNiCoAlTi

В.В. Поклонов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, г. Томск

E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

Influence of the ageing time on the superelasticity in single crystals of FeNiCoAlTi alloy

V.V. Poklonov

National Research Tomsk State University, 634050, Tomsk

E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

Известно, что в сплавах на основе железа условия для термоупругих γ - α' мартенситных превращений (МП) создаются за счет выделения наноразмерных дисперсных частиц γ' -фазы, атомно-упорядоченной по типу L1₂. Варьированием размера и объемной доли дисперсных частиц можно изменить не только тип структуры мартенсита, но и управлять температурами МП, уровнем напряжений аустенитной и мартенситной фаз и температурным интервалом сверхэластичности (СЭ) [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния времени старения при температуре 973 К на развитие термоупругого γ - α' -МП под нагрузкой в [001]-монокристаллах сплава на основе железа Fe-28%Ni-17%Co-11,5%Al-2,5%Ti (ат. %). Выбор ориентации [001] обусловлен максимальным теоретическим значением величины деформации решетки $\varepsilon_0 = 8,7\%$ при деформации растяжением. Исследования проводились после старения в атмосфере гелия при температуре 973 К в течение 3 (кристаллы А) и 5 ч (кристаллы В). В кристаллах А размер частиц 5–7 нм, а в кристаллах В – размер 7,5–9,5 нм.

На рис. 1 представлены результаты исследования температурной зависимости осевых напряжений $\sigma_{0,1}$ для монокристаллов сплава FeNiCoAlTi в однофазном состоянии и после старения при $T = 973$ К в течение 3 и 5 часов при деформации растяжением. Видно, что в однофазном состоянии кривая $\sigma_{0,1}(T)$ имеет характерную для ГЦК-сплавов температурную зависимость – с увеличением температуры испытания $\sigma_{0,1}$ уменьшаются. При старении при $T = 973$ К в течении 3 и 5 часов наблюдается изменение температурной зависимости $\sigma_{0,1}(T)$, и температурная зависимость имеет вид, который наблюдается в сплавах, испытывающих МП под нагрузкой. На кривых $\sigma_{0,1}(T)$ в температурном интервале $T = 77$ –550 К наблюдаются две стадии. На первой стадии при $77 \text{ К} < T < M_d$ (M_d – температура, при которой напряжения образования мартенсита под нагрузкой равны напряжениям течения высокотемпературной фазы) происходит линейное увеличение

$\sigma_{0,1}$ с ростом температуры испытания, которое описывается соотношением Клапейрона–Клаузиуса

$$d\sigma_{0,1}/dT = -\Delta H/\varepsilon_0 T_0. \quad (1)$$

Здесь ΔH – изменение энтальпии при γ - α' -МП; ε_0 – деформация превращения при γ - α' -МП; T_0 – температура химического равновесия γ - и α' -фаз.

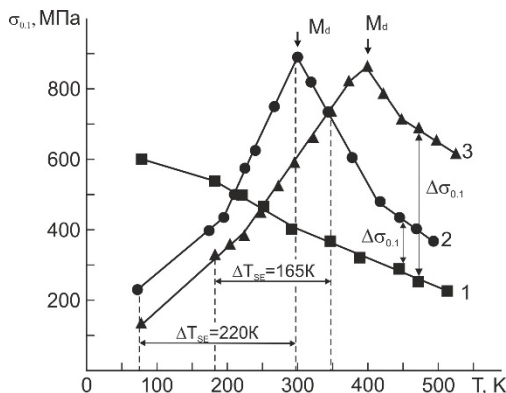


Рис. 1. Температурная зависимость осевых напряжений $\sigma_{0,1}$ и температурный интервал сверхэластичности для [001]-монокристаллов сплава FeNiCoAlTi в однофазном состоянии после закалки (кривая 1) и старения при 973 К в течение 3 (кривая 2) и 5 ч (кривая 3) при деформации растяжением

Вторая стадия, связанная с деформацией высокотемпературной фазы, характеризуется нормальной зависимостью $\sigma_{0,1}(T)$, свойственной для материалов с ГЦК решеткой при деформации скольжением. Анализ данных, представленных на зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ показывает, что, во-первых, увеличение размера частиц γ' -фазы приводит к увеличению прочностных свойств высокотемпературной фазы. Упрочнение высокотемпературной фазы в чистом виде можно определить как разницу напряжений $\Delta\sigma_{0,1}$ в кристаллах в состаренном и однофазном состоянии при температуре испытания, находящейся выше $T(M_d)$: в кристаллах А $\Delta\sigma_{0,1} = 140$ МПа, а в кристаллах В $\Delta\sigma_{0,1} = 415$ МПа. Во-вторых, увеличение размера частиц γ' -фазы сопровождается повышением температуры начала прямого МП M_S и $T(M_d)$: в кристаллах А $M_S < 77$ К, $T(M_d) = 300$ К, а в кристаллах В $M_S < 77$ К и $T(M_d) = 400$ К. Это качественно подтверждается разным уровнем напряжений при 77 К: в кристаллах А $\sigma_{0,1}(77 \text{ К}) = 230$ МПа, а в кристаллах В $\sigma_{0,1}(77 \text{ К}) = 130$ МПа. В-третьих, с увеличением размера частиц γ' -фазы изменяется величина $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$: в кристаллах А $\alpha_1 = 3,3$ МПа/К, а в кристаллах В $\alpha_2 = 2,7$ МПа/К.

Установлено, что в кристаллах А и В СЭ наблюдается в широком температурном интервале: в кристаллах А ΔT_{SE} равен = 220 К, а в кристаллах В $\Delta T_{SE} = 165$ К (рис. 1). На рис. 2 представлены кривые СЭ, полученные в экспериментах по циклированию для кристалла А при $T = 77$ К (рис. 2, а) и для кристалла В при $T = 223$ К (рис. 2, б). Эксперименты по циклированию позволяют определить максимальную величину СЭ.

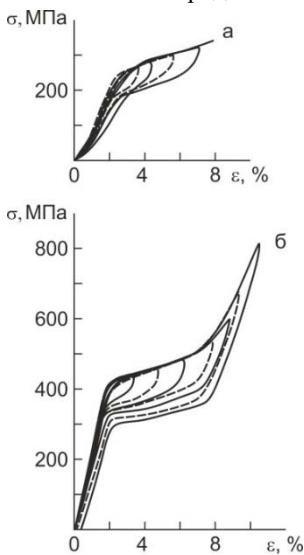


Рис. 2. Кривые «напряжение – деформация» при растяжении в [001]-монокристаллах сплава FeNiCoAlTi: а – кристалл А при температуре испытания 77 К; б – кристалл В при температуре испытания 223 К

В кристаллах В максимальная величина СЭ равна $\varepsilon_{SE} = 6,4\%$, в кристаллах А $\varepsilon_{SE} = 4\%$. Значения ε_{SE} для всех времен старения не достигают теоретической величины деформации решетки ε_0 при γ - α' -МП. Это связано, во-первых, с уменьшением объема матрицы, испытывающей γ - α' -МП при выделении частиц γ' -фазы, которые сами не испытывают МП, а деформируются только упруго, и, во-вторых, из-за наличия крупных частиц карбида титана TiC, которые возникают в процессе выплавки и роста монокристаллов и приводят к уменьшению пластичности кристаллов.

Итак, экспериментально на монокристаллах сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением установлено, что изменением времени старения при одной температуре старения можно управлять температурами МП, уровнем напряжений высокотемпературной фазы, величиной обратимой деформации и интервалом проявления СЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-00092а. Автор выражает благодарность научным руководителям И.В. Киреевой и Ю.И. Чумлякову за помощь в эксперименте и обсуждении результатов.

Литература

1. Кокорин В.В. Мартенситные превращения в неоднородных твердых растворах. Киев : Наукова думка, 1987. 168 с.
2. Sehitoglu H., Zhang X.Y., Kotil T., Canadinc D. et al. Shape memory behavior of FeNiCoTi single and polycrystals // Metallurgical and Materials Transactions A. 2002. V. 33A. P. 3661–3672.