

СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ [001]-МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА FeNiCoAlTi, УПРОЧНЕННЫХ НАНОРАЗМЕРНЫМИ КОГЕРЕНТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Поклонов В.В., Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Куксгаузен Д.А.,
Куксгаузен И.В., Победенная З.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия, poklonov_vyacheslav@mail.ru

На монокристаллах сплава на основе железа Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%), ориентированных для растяжения вдоль [001]-направления, исследовано влияние размера частиц γ' -фазы на температуры мартенситных превращений (МП) (M_S , M_F , A_S , A_F), прочностные свойства высокотемпературной фазы, зависимость критических напряжений от температуры и сверхэластичность (СЭ).

Во-первых, показано, что старение при $T = 873$ К в течение 4 и 16 часов приводит к развитию при охлаждении/нагреве в свободном состоянии термоупругих γ - α' -МП, которые не наблюдаются в закаленном состоянии. Методами просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при старении происходит выделение наноразмерных частиц γ' -фазы, которые имеют размеры $d_1 = 4$ нм и $d_2 = 16$ нм после выдержки, соответственно, 4 часа и 16 часов при $T = 873$ К. Установлено, что температуры МП, определенные по зависимости удельного электрического сопротивления от температуры, зависят от времени старения: $M_S^1 = 123$ К ($t_{ст} = 4$ часа), $M_S^2 = 256$ К ($t_{ст} = 16$ часов), а величина термического гистерезиса $\Delta T_{тер} = A_F - M_S$ равна 60 К и не зависит от времени старения.

Во-вторых, исследована зависимость критических напряжений $\sigma_{0.1}$ от температуры испытания в интервале от 77 до 573 К. Экспериментально установлено, что зависимость $\sigma_{0.1}(T)$ для двух исследованных размеров частиц $d_1 = 4$ нм и $d_2 = 16$ нм оказывается близкой друг к другу и имеет две стадии, характерные для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой. На первой низкотемпературной стадии $\sigma_{0.1}$ возрастают с увеличением температуры испытания и зависимость $\sigma_{0.1}(T)$ оказывается близкой к линейной и описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса: $\alpha = d\sigma_{0.1} / dT = -\Delta H / \varepsilon_0 T_0 = -\Delta S / T_0$, где ΔH , ΔS – соответственно изменение энтальпии и энтропии при γ - α' -МП, ε_0 – деформация превращения, T_0 – температура химического равновесия фаз. Анализ результатов показывает, что при увеличении времени старения от 4 до 16 часов происходит параллельный сдвиг кривой $\sigma_{0.1}(T)$ в область высоких температур, что находится в полном соответствии с результатами, полученными при исследовании зависимости удельного электрического сопротивления от температуры. Значения величины α зависят от времени старения и равны $\alpha_1 = 3,3$ МПа / К и до $\alpha_2 = 2,5$ МПа / К для 4 и 16 часов, соответственно. Вторая высокотемпературная стадия зависимости $\sigma_{0.1}(T)$ имеет нормальную температурную зависимость, характерную для деформации скольжением, когда с ростом температуры испытания происходит уменьшение $\sigma_{0.1}$. Интересно, что величина $\Delta\sigma$, которая рассчитывалась как разница напряжений $\sigma_{0.1}(M_d) - \sigma_{0.1}(M_d + 200$ К), сильно зависит от времени старения. Так, $\Delta\sigma_1 = 400$ МПа и $\Delta\sigma_2 = 75$ МПа для старения в течение 4 и 16 часов, соответственно. Здесь за температуру M_d принимали температуру, при которой на зависимости $\sigma_{0.1}(T)$ достигаются максимальные значения $\sigma_{0.1}$, которые оказываются равными напряжениям для начала γ - α' -МП под нагрузкой и напряжениям начала пластической деформации скольжением высокотемпературной γ -фазы (аустенита). Показано, что $M_d^1 = 373$ К, $\sigma_{0.1}^1(M_d) = 870$ МПа в кристаллах, состаренных в течение 4 часов и $M_d^2 = 423$ К, $\sigma_{0.1}^2(M_d) = 640$ МПа для старения в течение 16 часов.

В-третьих, установлено, что СЭ, связанная с развитием обратимых $\gamma \leftrightarrow \alpha'$ -МП, наблюдается только после старения в течение 4 часов, а с увеличением времени старения до 16 часов СЭ не наблюдается. СЭ наблюдается в широком интервале температур от $A_F = 183$ К до $T = 323$ К. Величина механического гистерезиса $\Delta\sigma_{\text{мех}}$ при обратимой деформации $\varepsilon_{\text{обр}} = 3,5$ % равна 220 МПа и слабо зависит от температуры деформации. Циклирование в режиме СЭ при фиксированной температуре испытания, например, при $T = 313$ К показало, что величина механического гистерезиса $\Delta\sigma_{\text{мех}}$ оказывается зависящей от величины обратимой деформации $\varepsilon_{\text{обр}}$, заданной в цикле: при $\varepsilon_{\text{обр}} = 1,2$ % $\Delta\sigma_{\text{мех}} = 100$ МПа и возрастает до 220 МПа при $\varepsilon_{\text{обр}} = 3,5$ %. Одновременно с ростом механического гистерезиса наблюдается уменьшение напряжений для начала γ - α' -МП от 600 МПа до 440 МПа и появляется необратимая деформация $\varepsilon_{\text{необр}} = 0,25$ %.

Итак, экспериментально показано, что наночастицы диаметром $d_1 = 4$ нм определяют способность [001]-кристаллов Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%) испытывать обратимые $\gamma \leftrightarrow \alpha'$ -МП под нагрузкой в температурном интервале от 183 до 323 К, а при упрочнении частицами с $d_2 = 16$ нм обратимые термоупругие превращения наблюдаются только при охлаждении/нагреве в свободном состоянии.

Предполагается, что частицы γ' -фазы с $d_1 = 4$ нм имеют когерентное сопряжение решеток с высокотемпературной γ -фазой (аустенитом) и когерентность сохраняется при γ - α' -МП. Развитие γ - α' -МП происходит в высокопрочной аустенитной фазе, в которой $\sigma_{0,1}^1 (M_d) = 870$ МПа и это приводит к затруднению развития пластической деформации аустенита при γ - α' -МП под нагрузкой. Рост частиц до $d_2 = 16$ нм сопровождается разупрочнением высокотемпературной фазы и $\sigma_{0,1}^2 (M_d)$ уменьшается до 640 МПа. Частицы с $d_2 = 16$ нм могут иметь полукogerентное сопряжение с аустенитом и при γ - α' -МП становятся полностью некогерентными. В результате при γ - α' -МП не происходит накопления упругой энергии ΔG_{el} , которая релаксирует за счет образования дислокаций и приводит к росту рассеянной энергии ΔG_{diss} . При $d_1 = 4$ нм при γ - α' -МП запасается значительная упругая энергия ΔG_{el} , которая значительно превышает ΔG_{diss} и способствует развитию γ - α' -МП под нагрузкой.

Наконец, полученные в работе эффекты СЭ на монокристаллах Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%) и их отсутствие в кристаллах Fe–29%Ni–18%Co–4%Ti (ат.%) свидетельствует о том, что атомную структуру когерентных частиц необходимо учитывать при анализе условий для достижения СЭ в этих сплавах. В этих кристаллах размер, объемная доля частиц γ' -фазы и величина $\sigma_{0,1} (M_d)$ оказываются близкими при $d \approx 4 - 6$ нм, различие состоит в том, что в кристаллах Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%) выделяются частицы $(\text{FeNiCo})_3\text{AlTi}$, а в кристаллах Fe–29%Ni–18%Co–4%Ti (ат.%) $(\text{FeNiCo})_3\text{Ti}$. Предполагается, что константы упругости наночастиц, содержащих Al, могут быть больше, чем для частиц, не содержащих Al. В результате термический гистерезис $\Delta T_{\text{тер}} = 115 - 130$ К в кристаллах Fe–29%Ni–18%Co–4%Ti (ат.%) в два раза превышает термический гистерезис $\Delta T_{\text{тер}} = 60$ К для кристаллов Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%), что свидетельствует о развитии процессов диссипации упругой энергии ΔG_{el} при γ - α' -МП в Fe–29%Ni–18%Co–4%Ti (ат.%) и их отсутствии в кристаллах Fe–28%Ni–17%Co–11,5%Al–2,5%Ti (ат.%).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №19-49-04101.