

Сверхэластичное поведение [001]-монокристаллов неэквивалентного высокоэнтропийного сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta с наноразмерными частицами γ' -фазы

Ю.И. Чумляков¹, И.В. Куксгаузен¹, Д.А. Куксгаузен¹,
В.А. Петраков¹, И.В. Киреева¹, В.А. Кириллов¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Впервые исследована обратимая деформация при γ - α' -мартенситном превращении (МП) в неэквивалентных высокоэнтропийных Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) кристаллах, ориентированных вдоль направления [001], при растяжении. Большая обратимая деформация $\varepsilon_{об} = 10.5\%$ наблюдается при размере частиц γ' -фазы $d = 3-5$ нм и уменьшается до 5.8% при $d = 7-9$ нм. Установлено, что $\varepsilon_{об} = 10.5\%$ превышает теоретическое значение деформации решетки превращения $\varepsilon_{пр} = 7.76\%$. Физическая причина $\varepsilon_{об} > \varepsilon_{пр}$ связана с развитием обратимого γ - α' МП и упругого $\langle 011 \rangle \{110\}$ механического двойникования в α' -мартенсите.

Ключевые слова: γ - α' -термоупругое мартенситное превращение, обратимая деформация, монокристаллы, наноразмерные частицы γ' -фазы.

Введение

Известно, что в неэквивалентных высокоэнтропийных сплавах Fe–Ni–Co–Al–X (X = Ta, Ti, Nb, V) наблюдается эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ), которые связаны с обратимым ГЦК(γ)–ОЦТ(α') термоупругим мартенситным превращением (МП) [1–14]. Эти сплавы по функциональным и прочностным свойствам не уступают сплавам TiNi, которые широко используются в технике и медицине. Необходимые условия для обратимого γ - α' МП достигаются за счет выделения наноразмерных частиц γ' -фазы (упорядоченная по типу Ni₃Al L1₂-структура) размером $d < 10$ нм [1–3, 6–13].

В поликристаллах Fe–Ni–Co–Al–Ta–V при температуре 300 К при растяжении были обнаружены большая обратимая деформация $\varepsilon_{об}$ до 13.5%, высокие прочностные свойства до 1 ГПа и большой механический гистерезис $\Delta\sigma$ [1]. Физическая причина аномально высокой обратимости, которая превышала теоретическую величину деформации решетки при превращении $\varepsilon_{пр} = 8.7\%$ при деформации растяжением вдоль направления [001], связана с вкладом в обратимую деформацию $\langle 011 \rangle \{011\}$ упругого механического двойникования α' -мартенсита [10]. Это экспериментально было показано на монокристаллах Fe–Ni–Co–Al–Nb с осью растяжения вдоль направления [001], содержащих наноразмерные частицы γ' -фазы ((FeNiCo)₃AlNb) диаметром $d = 3-5$ нм [10].

В представленной работе ставилась задача выяснить принципиальную возможность достижения условия $\varepsilon_{об} > \varepsilon_{пр}$ в монокристаллах Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) при растяжении вдоль направления [001] и исследовать зависимость величины $\varepsilon_{об}$ от размера частиц γ' -фазы при температуре старения 973 К в течение 0.5 и 5 ч.

1. Материал и методы исследования

Монокристаллы сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%) выращивали методом Бриджмена. Образцы для растяжения вдоль направления [001] в форме двойной лопатки размером 2×1.5×15 мм вырезали на электроискровом станке. Образцы гомогенизировали в атмосфере гелия при 1570 К в течение 24 ч и затем закачивали в воду. Старение при 973 К проводили в атмосфере гелия. Температуры МП при охлаждении до 77 К и нагреве до 573 К исследовали по температурной зависимости электрического сопротивления $\rho(T)$. Структуру α' -мартенсита изучали на оптическом микроскопе Keyence VHX-2000. Размер частиц γ' -фазы и тип двойников в α' -мартенсите определяли на электронном микроскопе Jeol 2010 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Механические свойства и величину обратимой деформации при растяжении исследовали на испытательной машине Instron 5969 при скорости деформации $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Напряжения $\sigma_{кр}$ в температурном интер-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 25-19-00024, <https://rscf.ru/project/25-19-00024/>.