

УДК 669:539.371:548.55

DOI: 10.17223/00213411/68/12/5

## Влияние частиц $\gamma'$ - и $\beta$ -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК–ОЦТ-мартенситного превращения в [001]-кристаллах высокоэнтропийного сплава FeNiCoAlTa\*

Ю.И. Чумляков<sup>1</sup>, И.В. Киреева<sup>1</sup>, И.В. Куксгаузен<sup>1</sup>, Д.А. Куксгаузен<sup>1</sup>, В.А. Петраков<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Представлены результаты исследования по влиянию частиц  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фазы на развитие под нагрузкой ГЦК–ОЦТ-мартенситного превращения (МП) и температурный интервал сверхэластичности (СЭ) в высокопрочных высокоэнтропийных неэквивалентных кристаллах Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Ta (ат.%), ориентированных для растяжения вдоль [001]-направления в ГЦК-фазе. Показано, что одноступенчатое старение при 973 К, 10 ч и двухступенчатое старение при 973 К, 5 ч и затем при 873 К, 3 ч приводит к созданию нанокomпозитной структуры, состоящей из ГЦК-фазы и частиц двух фаз:  $\gamma'$ -фазы (атомно-упорядоченной по типу  $L1_2$ ) и  $\beta$ -фазы (атомно-упорядоченной по типу  $B2$ ). После термических обработок СЭ наблюдается в интервале температур от температуры начала прямого превращения при охлаждении  $M_s$  до 298 К после старения при 973 К, 10 ч и до 393 К после двухступенчатого старения. В кристаллах, состаренных при 973 К, 0.5 ч, происходит выделение только частиц  $\gamma'$ -фазы и СЭ наблюдается в интервале температур от 77 до 323 К. Проведен термодинамический анализ, который показал, что появление СЭ при  $T \geq M_s$  связано с влиянием частиц  $\beta$ -фазы на уровень упругой энергии при МП  $\Delta G_{el}$ .

**Ключевые слова:** монокристаллы, мартенситное превращение, наноразмерные частицы  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фазы, сверхэластичность.

### Введение

В последнее время значительный научный и практический интерес связан с разработкой новых высокоэнтропийных неэквивалентных сплавов FeMnNiAlCr, FeMnCrNiSi, FeNiCoAlX (X = Ta, Ti, Nb) с эффектом памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ), которые могут конкурировать со сплавами на основе TiNi [1–14]. Эти сплавы на основе железа имеют ряд преимуществ по сравнению со сплавами на основе TiNi [1]. Во-первых, они обладают высокой пластичностью в закаленном состоянии из-за отсутствия дальнего порядка, который уменьшает пластичность, и могут деформироваться до 96% при комнатной температуре [3–6]. В  $B2$ -интерметаллидах на основе TiNi пластичность не превышает 20–30% и сильно зависит от концентрации Ti и Ni [1–4]. Во-вторых, сплавы на основе железа состоят из недорогих компонентов и, следовательно, могут использоваться как большеразмерные элементы весом до нескольких тонн, например, как демпфирующие системы в небоскребах и других приложениях [3, 8, 9].

В высокоэнтропийных сплавах FeNiCoAlX (X = Ta, Ti, Nb, V) высокотемпературная ГЦК-фаза (аустенит) испытывает термоупругое мартенситное превращение (МП) в ОЦТ-мартенсит и с ГЦК–ОЦТ МП связаны аномально большие значения СЭ от 5 до 13.5% и ЭПФ от 5 до 8.7% в поли- и монокристаллах [3–14]. В поли- и монокристаллах неэквивалентных высокоэнтропийных сплавов FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti, V) при старении обнаружены два типа наноразмерных частиц: когерентные частицы  $\gamma'$ -фазы с упорядоченной по типу  $L1_2$ -структурой в теле зерна поликристаллов и в монокристаллах и некогерентные частицы  $\beta$ -фазы с упорядоченной по типу  $B2$ -структурой по границам зерен в поликристаллах и в монокристаллах [2–14]. Химический состав  $\gamma'$ -фазы близок к  $(\text{FeNiCo})_3\text{AlX}$  (X = Ta, Nb, Ti), а  $\beta$ -фазы близок к  $(\text{FeNiCo})\text{AlX}$  (X = Ta, Nb, Ti) [3].

В поликристаллах FeNiCoAlX (X = Ta, Nb, Ti) выделение частиц  $\beta$ -фазы по границам зерен приводит к хрупкому разрушению вдоль границ зерен с начала развития МП под нагрузкой, что делает невозможным исследование ЭПФ и СЭ [3, 8, 9]. Легирование бором от 0.03 до 0.07 ат.% одновременно с созданием высокой плотности малоугловых границ в теле зерна затрудняет выделение частиц  $\beta$ -фазы вдоль границ зерен. Выделение когерентных частиц  $\gamma'$ -фазы диаметром  $d = 3\text{--}5$  нм в сочетании с острой текстурой  $\langle 100 \rangle \{035\}$  в поликристаллах и выбором ориентации [001] в монокристаллах создает условия для наблюдения аномально большой СЭ до 9–13.5% с большим механическим гистерезисом  $\Delta\sigma = 400$  МПа и ЭПФ от 4 до 8% [3, 8–10]. Увеличение раз-

\* Результаты были получены за счет гранта Российского научного фонда № 25–19–00024, <https://rscf.ru/project/25–19–00024/>.