

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНИКЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Материалы
II Всероссийской научной конференции молодых ученых
с международным участием (ПМТС-2015)

*6–9 октября 2015 года
Томск, Россия*

Томск
Издательство ТГАСУ
2015

УДК 539.371:548.55

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ И СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА FeNiCoAlTi*

В.В. Поклонов, И.В. Киреева, Ю.И. Чумляков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

В [001] и [011] монокристаллах нового ферромагнитного сплава на основе железа FeNiCoAlTi, состаренных при температуре $T = 973$ К, 7 ч, экспериментально установлена ориентационная зависимость величины $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$, эффекта памяти формы, сверхэластичности и температурного гистерезиса. Максимальное значение величины обратимой деформации наблюдается в ориентации [001] и составляет $\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = 3,5$ %.

В работах [1, 2] показано, что сплавы на основе железа способны проявлять не только эффект памяти формы (ЭПФ), но и сверхэластичность (СЭ). Условия возникновения данных функциональных свойств реализуются за счет выделения дисперсных частиц γ' -фазы атомноупорядоченной по типу $L1_2$. В литературных источниках отсутствуют исследования зависимости свойств СЭ и ЭПФ от ориентации монокристаллов сплавов на основе железа. Поэтому целью настоящей работы является изучение ориентационной зависимости величин ЭПФ $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$ и СЭ $\varepsilon_{\text{СЭ}}$ в монокристаллах сплава FeNiCoAlTi, которые испытывают γ - α' мартенситное превращение (МП) при деформации растяжением. Для реализации поставленной цели были выбраны монокристаллы, ориентированные вдоль направлений [001] и [011], отличающиеся величиной деформации решетки в 2 раза, а именно: для ориентации [001] теоретическое значение величины деформации решетки равно $\varepsilon_0 = 8,7$ %, а для [011] направления ε_0 составляет 4,1 % [2]. Исследования проводились после старения при температуре 973 К в течение 7 ч.

На рис. 1 представлена температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{0,1}(T)$ при деформации растяжением для [001] и [011] монокристаллов, которая имеет вид, характерный для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой, и имеет две стадии. На первой стадии $77 \text{ К} < T < M_d$ (M_d – температура, при которой напряжения высокотемпературной фазы оказываются равными напряжению, необходимому для образования мартенсита под нагрузкой) $\sigma_{0,1}$ линейно возрастают с ростом температуры испытания, и описываются соотношением Клапейрона – Клаузиуса (1): $\frac{d\sigma_{0,1}}{dT} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon_0 T_0}$ (1). Здесь ΔH – изменение энтальпии при γ - α' МП; ε_0 – деформация решетки, которая зависит от ориентации кристал-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-08-00092а.

ла; T_0 – температура химического равновесия γ - и α' -фаз. Анализ температурной зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ показывает, что от ориентации монокристалла зависит, во-первых, величина $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$: в [001] направлении $\alpha_1 = 2,8$ МПа/К, в [011] направлении $\alpha_2 = 3,9$ МПа/К, и, во-вторых, температура $T(M_d)$ и уровень напряжений $\sigma_{0,1}(M_d)$: в [001] монокристаллах $T(M_d) = 430$ К и $\sigma_{0,1}(M_d) = 825$ МПа, а для [011] кристаллов $T(M_d) = 330$ К и $\sigma_{0,1}(M_d) = 925$ МПа. При $T > M_d$ наблюдается вторая стадия, связанная с деформацией высокотемпературной фазы, на которой напряжения $\sigma_{0,1}$ падают с ростом температуры испытания и данная динамика характерна для материалов с ГЦК решеткой при деформации скольжением.

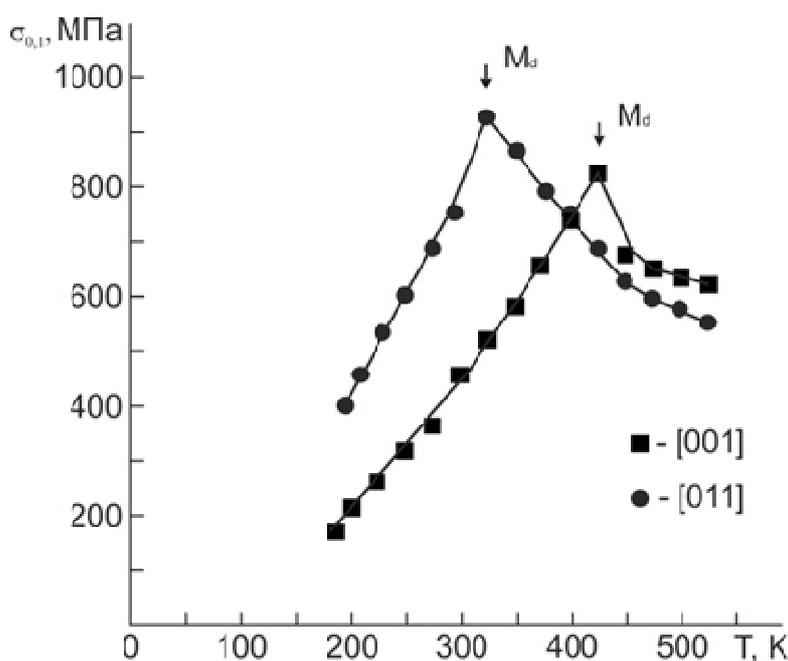


Рис. 1. Температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{0,1}$ для [001] и [011] монокристаллов сплава FeNiCoAlTi

На рис. 2 представлены результаты по исследованию ЭПФ при охлаждении/нагреве под постоянной внешней растягивающей нагрузкой $\sigma_{внеш}$. На рис. 3 показаны зависимости величин температурного гистерезиса ΔT и величины деформации превращения $\epsilon_{ЭФП}$ от внешней растягивающей нагрузки. Видно, что при охлаждении/нагреве под нагрузкой в кристаллах наблюдается одностадийное γ - α' МП, которое является полностью обратимым. Следовательно, наблюдается ЭПФ, величина которого зависит от ориентации кристалла.

В ориентации [001] деформация превращения $\epsilon_{ЭФП}=3\%$ реализуется при минимальных напряжениях $\sigma_{внеш} = 50$ МПа, а при $\sigma_{внеш} = 100$ МПа достигается максимальная величина обратимой деформации, равная 3,5 %. При дальнейшем увеличении $\sigma_{внеш}$ величина обратимой деформации меняется незначительно. При $\sigma_{внеш} = 175$ МПа кристалл разрушается.

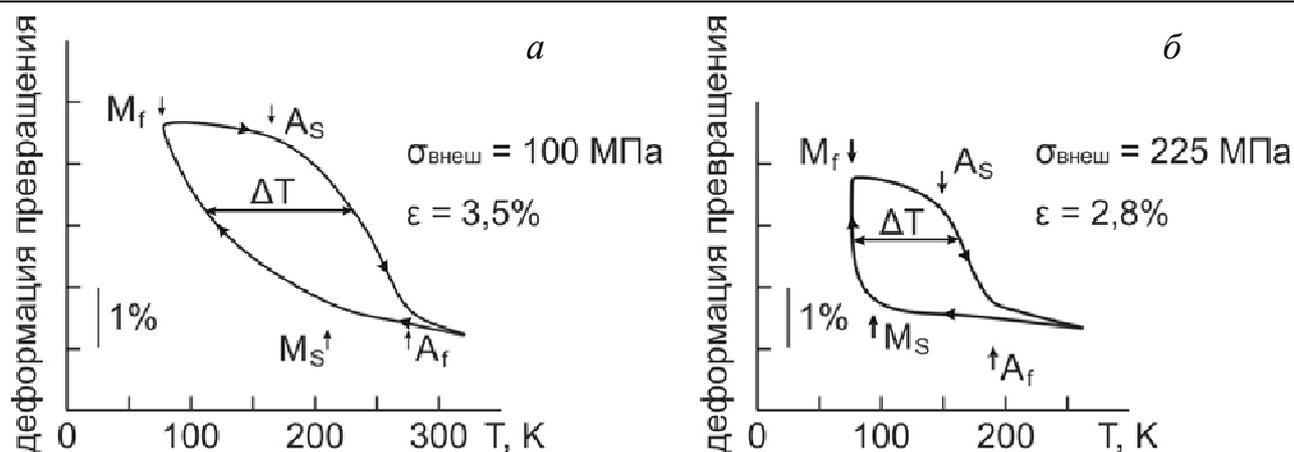
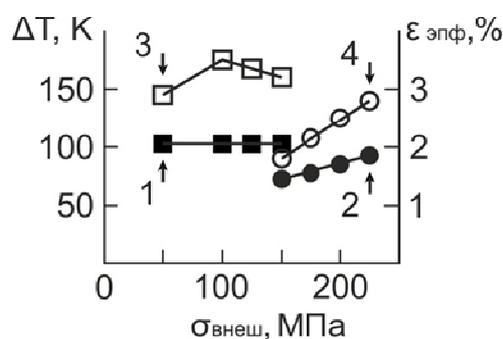


Рис. 2. Величина эффекта памяти формы под постоянной растягивающей нагрузкой для [001] (а) и [011] (б) монокристаллов сплава FeNiCoAlTi

В монокристаллах, ориентированных вдоль [011] направления, ЭПФ, равный 2 %, реализуется при минимальных напряжениях $\sigma_{\text{внеш}} = 150$ МПа, которые в 3 раза превышают уровень напряжений для развития МП под нагрузкой для [001] направления. Максимальная величина обратимой деформации $\varepsilon_{\text{ЭФП}} = 2,8$ % достигается при $\sigma_{\text{внеш}} = 225$ МПа. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки кристалл разрушается.

Рис. 3. Зависимости величин температурного гистерезиса:

1 – [001] ориентация; 2 – [011] ориентация и эффекта памяти формы; 3 – [001] ориентация, 4 – [011] ориентация от внешней растягивающей нагрузки для монокристаллов сплава FeNiCoAlTi



Значение $\varepsilon_{\text{ЭФП}}$ в обеих ориентациях не достигают теоретической величины деформации решетки ε_0 при γ - α' МП для соответствующей ориентации. Это связано с двумя факторами: 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 ограничивают пластичность кристалла. Обнаруженная ориентационная зависимость величины $\varepsilon_{\text{ЭФП}}$ объясняет ориентационную зависимость величины α : меньшему значению α_1 в [001] кристаллах соответствует большее значение $\varepsilon_{\text{ЭФП}}$, а в [011] кристаллах наоборот, что находится в полном согласии с соотношением (1). Из рис. 3 видно, что от ориентации кристалла зависит не только величина $\varepsilon_{\text{ЭФП}}$, но и величина температурного гистерезиса ΔT .

В [001] кристаллах при $\sigma_{\text{внеш}} = 50$ МПа $\Delta T = 105$ К и с увеличением приложенной нагрузки не изменяется, тогда как в [011] ориентации при минимальных $\sigma_{\text{внеш}} = 150$ МПа $\Delta T = 70$ К и с ростом $\sigma_{\text{внеш}}$ увеличивается до $\Delta T = 95$ К.

На рис. 4 представлены « σ - ε »-кривые при деформации растяжением для монокристаллов сплава FeNiCoAlTi при температуре $T = 183$ К, которая лежит выше температуры конца обратного МП при нагреве A_f . Видно, что для [001] ориентации при данной температуре СЭ не наблюдается. Это связано с тем, что условия для реализации совершенной петли СЭ не достигаются: $\sigma_{0,1} < \Delta\sigma$ ($\Delta\sigma$ – величина механического гистерезиса). В кристаллах [011] ориентации $\sigma_{0,1} > \Delta\sigma$ и СЭ при данной температуре имеет место. Максимальная величина СЭ $\varepsilon_{\text{СЭ}}$, определенная в эксперименте по циклированию при $T = 183$ К, при заданной деформации $\varepsilon_{\text{зад}} = 10\%$ равна 4,9 %, что так же не достигает величины ε_0 .

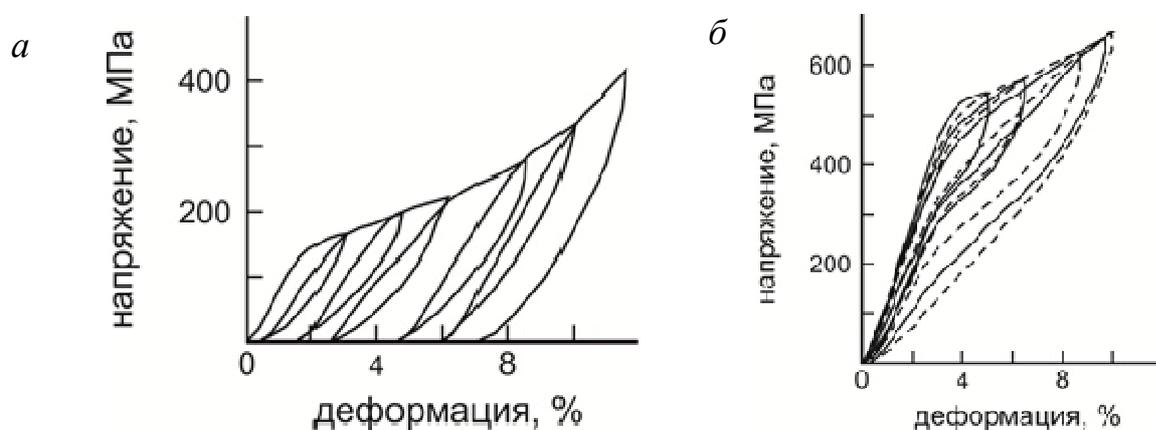


Рис. 4. Сверхэластичность в [001] (а) и [011] (б) монокристаллах сплава FeNiCoAlTi при деформации растяжением при температуре $T = 183$ К

Таким образом, экспериментально на монокристаллах сплава на основе железа FeNiCoAlTi при деформации растяжением установлено, что величины $\alpha = d\sigma_{0,1}/dT$, ЭПФ, СЭ и температурного гистерезиса зависят от ориентации кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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