ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
№ 11 ФИЗИКА 2011

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 669.539.371:548.55

И.В. КИРЕЕВА, Ю.И. ЧУМЛЯКОВ*, И.В. КРЕТИНИНА*, I. KARAMAN**, E. CESARI****

СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CoNiGa, СОДЕРЖАЩИХ ЧАСТИЦЫ γ-ФАЗЫ[1]

Ключевые слова: *монокристаллы, γ-фаза, термоупругое γ–ε-мартенситное превращение, сверхэластичность.*

В сплавах, испытывающих обратимые термоупругие превращения под нагрузкой, могут наблюдаться последовательно несколько мартенситных превращений (МП). Развитие каскада МП под нагрузкой установлено в кристаллах TiNiCu, CuNiAl, NiFeGa, в которых межмартенситные превращения приводят к значительным эффектам сверхэластичности (СЭ) [1, 2]. Как правило, последовательное развитие каскада МП наблюдается в однофазных монокристаллах, в которых высокотемпературная фаза испытывает МП в низкосимметричный мартенсит.

В настоящей работе представлены результаты исследования развития МП в композитах на основе монокристаллов сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ (ат. %), в которых при росте происходит выделение частиц γ-фазы, имеющей состав CoNi с неупорядоченной ГЦК-решеткой в атомноупорядоченной по типу *B*2-матрице [3, 4]. Известно, что в сплавах CoNiGa *B*2-фаза испытывает термоупругий мартенситный переход в $L1_0$-тетрагональный мартенсит и деформация превращения ε_0 зависит от ориентации кристалла и способа деформации растяжения/сжатия [5, 6]. Так, при сжатии вдоль [001] и [012] направлений деформация решетки ε_0 соответственно равна 4,5 и 3,2 %. Дисперсные частицы γ-фазы сами могут испытывать γ–ε МП (γ–ε – ГЦК–ГПУ-переход; ГЦК-решетка переходит под нагрузкой или при охлаждении/нагреве в ГПУ-решетку) [3, 4], которые могут быть термоупругими МП, и, следовательно, под нагрузкой в частицах можно ожидать развития обратимых γ–ε МП. До сих пор в литературе нет данных о развитии СЭ в кристаллах CoNiGa с дисперсными частицами γ-фазы.

Монокристаллы сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ (ат. %) выращивали в атмосфере гелия методом Бриджмена. Методика подготовки образцов для деформации сжатием и структурных исследований представлена в [4]. Температуры МП определяли из анализа кривых зависимости электрического сопротивления от температуры $\rho(T)$. На кривой зависимости $\rho(T)$ обнаруживается только одно $B2$–$L1_0$ МП с температурами начала и конца прямого МП при охлаждении соответственно M_s = 255 K, M_f = 252 K и обратного МП при нагреве A_s = 267 K, A_f = 271 K с малым термическим гистерезисом $\Delta T = A_f - M_S$ = 16 K.

Установлено, что после роста монокристаллы сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ при T = 300 K оказываются двухфазными и состоят из высокотемпературной *B*2-фазы и крупных частиц γ-фазы неравноосной пластинчатой формы с толщиной d = 2,5–3 мкм и длиной L = 25–100 мкм [4]. По внутренней структуре частицы γ-фазы можно разделить на два типа: первый тип частиц – несдвойникованный и второй – сдвойникованный. Плоскость габитуса частиц γ-фазы второго типа оказывается параллельна (111) плоскости *B*2-фазы. Объемная доля частиц γ-фазы в монокристаллах после роста равна 7 % [4].

На кривой $\sigma(\varepsilon)$ в [001] кристаллах после первой стадии упругой деформации I_1 наблюдается «плато^{I}» – стадия с небольшими значениями коэффициента деформационного упрочнения Θ (рис. 1). Затем на кривой $\sigma(\varepsilon)$ имеет место стадия I_2 упругой деформации высокотемпературной *B*2-фазы, которая при $\sigma_{0,1}$ = 75 МПа сменяется на «плато^{II}» с малым Θ, где происходит $B2$–$L1_0$ МП под нагрузкой. «Плато^{II}» при σ > 150 МПа переходит в стадию III с высоким Θ. Аналогичная стадийность на кривой $\sigma(\varepsilon)$ обнаружена при сжатии в [012] кристаллах. Деформация на «плато^{II}» и стадии III при снятии нагрузки оказывается полностью обратимой, а ее общая величина превышает величину деформации решетки ε_0 для $B2$–$L1_0$ МП. Так, в [001] кристаллах ε_0 = 4,5 %, а общая обратимая деформация равна 6,5–6,7 %: на «плато^{II}» ε = 4,5 % и на стадии III ε_0 = 2– 2,2 %. Детально физическая природа обратимой деформации на «плато^{II}» и стадии III в монокристаллах сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ рассмотрена в [4]. Анализ полученных данных на [001] и [012] монокристаллах показывает, что величина напряжений $\sigma_{0,1}$, при которых происходит переход к «плато^{I}», величина деформации на «плато^{I}» $\varepsilon_{плато1}$ и механического гистерезиса Δσ на «плато^{I}» зависят от ориентации кристалла. Так, в [001] кристаллах при T = 300 K $\sigma_{0,1}$ = 5,5 МПа, $\varepsilon_{плато1}$ = 0,5–0,7 %, Δσ = 2,5 МПа, а в [012] кристаллах $\sigma_{0,1}$ = = 4,5 МПа, $\varepsilon_{плато1}$ = 0,9–1,2 %, Δσ = 3,06 МПа.

В экспериментах по циклированию в [001] кристаллах установлено, что деформация на «плато^{I}» при достижении уровня напряжений при нагрузке σ < 500 МПа полностью обратима после снятия нагрузки. При σ ≥ 500 МПа деформация на «плато^{I}» становится частично необратимой, при этом деформация на «плато^{II}»

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП, госконтракт № 16.740.11.0462

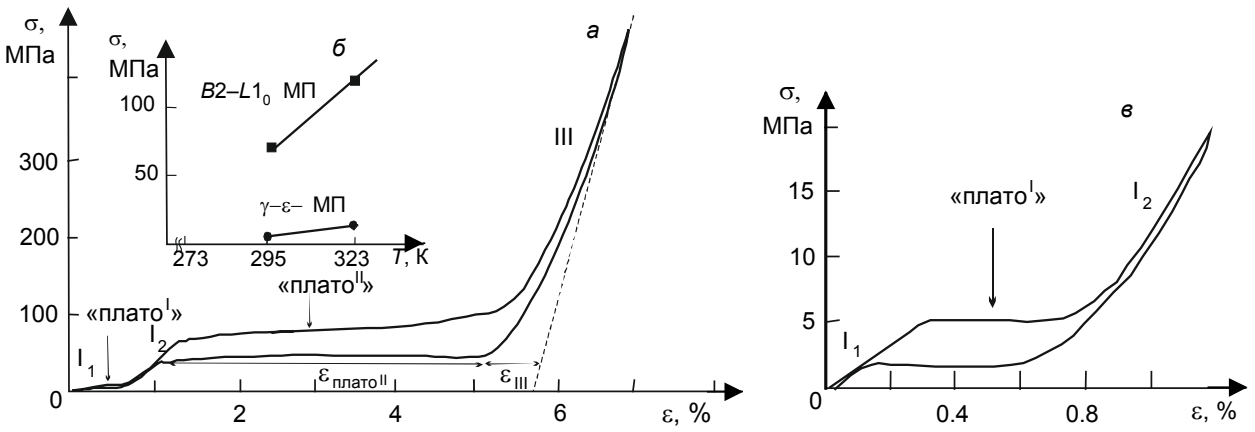

Рис. 1. Кривые σ(ε) для монокристаллов сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ при деформации сжатием при $T = 300$ К: *а* – стадии на σ(ε) кривой в [001] кристаллах; *б* – температурная зависимость напряжений $\sigma_{0,1}$ для МП под нагрузкой на «плато^{I}» и «плато^{II}»; *в* – «плато^{I}» в [001] кристаллах в увеличенном масштабе

и стадии III остается полностью обратимой. Электронно-микроскопические исследования необратимой деформации в [001] кристаллах показали, что в частицах наблюдается ε-мартенсит, который развивается под нагрузкой в трех системах (рис. 2), а в матрице мартенсит и пластическая деформация не обнаружены. Следовательно, обратимая деформация на «плато^{I}» связана с термоупругим γ–ε МП в частицах. Термоупругий характер γ–ε МП подтверждается исследованием температурной зависимости напряжений $\sigma_{0,1}$ (рис. 1, *б*). С ростом температуры испытания $\sigma_{0,1}$ для γ–ε МП возрастают линейно, как в сплавах с МП, и при $T = 323$ К $\sigma_{0,1}$ в [001] кристаллах становятся в 2 раза больше, чем при $T = 300$ К, и величина $\alpha = d\sigma/dT = 0{,}14$ МПа/К (рис. 1, *б*). При деформации двойникованием и скольжением $\sigma_{0,1}$ в сплавах с ростом температуры, напротив, уменьшаются [7]. На кривой зависимости ρ(*T*) монокристаллов сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ в состоянии после роста γ–ε МП не проявляется. Следовательно, γ–ε МП наблюдается только под нагрузкой.

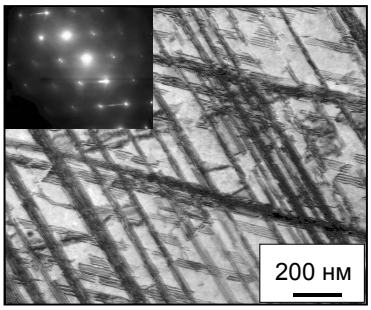

Рис. 2. Электронно-микроскопическое наблюдение ε-мартенсита в частицах γ-фазы в [001] монокристаллах сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ после роста при $T = 300$ К при деформации сжатием; ось зон $(011)_\gamma \| (-2110)_\varepsilon$

Итак, впервые на монокристаллах сплава $Co_{49}Ni_{21}Ga_{30}$ (ат. %) показано, что частицы γ-фазы испытывают γ–ε МП под нагрузкой, которое является обратимым. Обратимое γ–ε МП в частицах γ-фазы приводит к появлению новой стадии на кривой σ(ε), предшествующей *B*2–*L*1$_0$ МП под нагрузкой и к увеличению общей обратимой деформации. Так, в [001] кристаллах общая обратимая деформация с учетом обратимой деформации в частицах γ-фазы, на «плато^{II}» и на стадии III становится равной 7–7,4 %, что превышает деформацию решетки в этих кристаллах $\varepsilon_0 = 4{,}5$ % для *B*2–*L*1$_0$ МП в 1,6 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsuka K. and Wayman C.M. Shape Memory Materials. – Cambridge University Press., 1998. – 284 p.
2. Sutou Y., Kamiya N., Omori T., et al. // Appl. Phys. Lett. – 2004. – V. 84.– No. 8. – P. 1275–1277.
3. Liu J., Xie H., Huo Y., et al. // J. Alloys Compounds. – 2006. – V. 420. – P. 145–157.
4. Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В. и др. // ФММ. – 2010. – Т. 110. – № 1. – С. 81–93.
5. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Панченко Е.Ю. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 10. – С. 19–37.
6. DaddaJ., Maier H.J., Niklash D., et al. // Phys. Metal. Mater. Sci. – 2008. – V. 39. – No. 9. – P. 2026–2039.
7. Чумляков Ю.И., Киреева И.В., Коротаев А.Д. и др. // Изв. вузов. Физика. – 1996. – № 3. – С. 5–33.

*Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия
**Техасский университет, Техас, США
***Университет Балеарских островов, Пальма де Мальорка, Испания
E-mail: kireeva@spti.tsu.ru; chum@phys.tsu.ru

Поступило в редакцию 09.06.11.

Киреева Ирина Васильевна, д.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;
Чумляков Юрий Иванович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией;
Кретинина Ирина Владимировна, ведущ. специалист;
Караман Ибрагим, профессор;
Сезари Эдуард, профессор.