

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

1

DOI: 10.17223/9785946217408/243

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТИ В [001]-МОНОКРИСТАЛЛАХ $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат. %)

Ларченкова Н.Г., Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е., Чумляков Ю.И.
Томский государственный университет, Томск, Россия

Для практического применения конструкционных материалов актуальным является создание и исследование многофункциональных высокопрочных материалов, способных испытывать многократные обратимые деформации при внешних воздействиях. Ярким представителем таких сплавов являются монокристаллы на основе сплава NiFeGa(Co). Монокристаллы NiFeGa(Co) известны благодаря термоупругому L2₁-14M-L1₀ мартенситному превращению (МП), большим обратимым деформациям (при сжатии $\epsilon_{\text{rev}} = 6,25\%$ и при растяжении $\epsilon_{\text{rev}} = 13\%$) и широкому температурному интервалу развития сверхэластичности (СЭ) $T = 285-703\text{ K}$ [1, 2]. Монокристаллы NiFeGa, ориентированные вдоль [001]-направления, при заданной деформации 3% выдерживают до 18 000 циклов нагрузка/разгрузка при проявлении СЭ с высокой циклической стабильностью функциональных свойств [3]. Однако, как было показано на поликристаллах NiTi, скорость деформации может оказывать значительное влияние на: коэффициент деформационного упрочнения θ , обратимую деформацию ϵ_{rev} , механический гистерезис $\Delta\sigma$ и критические напряжения образования мартенсита σ_{cr} [4]. Исследование влияния скорости деформации на циклическую стабильность при проявлении СЭ является важным для практического применения материалов при многоцикловых нагрузках с неконтролируемой скоростью деформации. Поэтому целью данной работы является исследование влияния скорости деформации на циклическую стабильность СЭ в гетерофазных монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (ат. %), ориентированных вдоль [001]-направления при деформации сжатием.

Исследования проведены на образцах при сжатии в следующем структурном состоянии: высокотемпературный отжиг при $T = 1373\text{ K}$, 25 мин, с последующей закалкой в воду + старение в аустенитном состоянии при $T = 673\text{ K}$, 4 ч под нагрузкой $\sigma = 100\text{ МПа}$ (состаренные под нагрузкой кристаллы). В ходе проведения ступенчатой термомеханической обработки происходит выделение крупных частиц γ -фазы величиной 5-10 мкм с объёмной долей $f \sim 7\%$ и мелких дисперсных частиц γ' -фазы размерами 10-30 нм с объёмной долей $f \sim 3\%$. Крупные частицы γ -фазы могут быть препятствием для роста кристаллов мартенсита, но могут и способствовать возникновению кристаллов мартенсита, когда вблизи крупной частицы γ -фазы образуется большое скопление дислокаций [5]. Когерентные частицы γ' -фазы не испытывают мартенситное превращение (МП) и упрочняют материал. Старение под нагрузкой 100 МПа приводит к тому, что частицы γ' -фазы выстраиваются вдоль одного направления типа $\langle 111 \rangle$, в отличие от монокристаллов, состаренных в свободном состоянии, где может возникать до 4 вариантов направления типа $\langle 111 \rangle$. Таким образом, созданы наноструктурные композиционные материалы, обладающие хорошими прочностными характеристиками и высокой циклической стабильностью СЭ.

Экспериментально полученные кривые СЭ при $T_{\text{к}} = 298\text{ K}$ и изменении скорости испытания с $V = 0,4 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ до $V = 8 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ показали, что такие параметры как θ , $\Delta\sigma$ и σ_{cr} не изменяются, необратимая деформация $\epsilon_{\text{irr}} = 0\%$ (рис 1а). В то время, как сплавы NiTi при увеличении скорости деформации с $3,3 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ до $3,3 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$, близкие к экспериментально исследованным скоростям в настоящей работе, демонстрируют деградацию обратимой деформации ϵ_{rev} , появление необратимой деформации ϵ_{irr} и увеличение коэффициента θ в первых 20 циклах [5]. При увеличении количества циклов нагрузка/разгрузка до 50 000 в [001]-монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при $T_{\text{к}} = 298\text{ K}$ можно наблюдать три стадии деградации (рис. 1б). О циклической стабильности и деградации эффекта СЭ можно судить по изменению таких параметров, как σ_{cr} и $\Delta\sigma$. Первая стадия характеризуется падением σ_{cr} и $\Delta\sigma$ с 1 по 10 цикл за счёт накопления дислокаций и малой доли остаточного мартенсита, которые при

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

последующих циклах способствуют более легкому зарождению кристаллов мартенсита после 1 цикла и уменьшению диссипации энергии за счёт дислокационного упрочнения. Вторая стадия с 10 по 20 000 цикл характеризуется хорошей стабильностью кривых СЭ: σ_{cr} , $\Delta\sigma$ изменяются в пределах погрешности эксперимента и ε_{irr} не наблюдается. На третьей стадии с 20 000 по 50 000 цикл можно наблюдать плавное уменьшение σ_{cr} на 32 % и $\Delta\sigma$ на 15 %. Как показало оптическое исследование поверхности монокристалла после 50 000 циклов, это связано с увеличением объёмной доли остаточного мартенсита и накоплением дислокаций. Монокристаллы $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ проявляют более высокую циклическую стабильность СЭ по сравнению со сплавами NiTi, где при увеличении количества циклов до 50 приводит к проявлению необратимой деформации до $\varepsilon_{irr} = 4\%$ и уменьшению $\Delta\sigma$ в 5 раз [4].

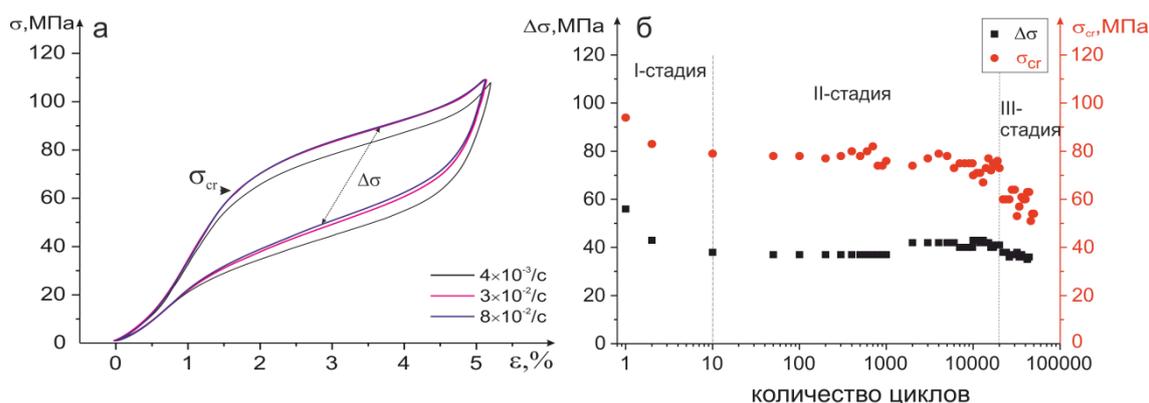


Рис. 1. а) Кривые $\sigma(\varepsilon)$ в [001]-монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ при разной скорости деформации
б) Зависимости σ_{cr} и $\Delta\sigma$ от количества циклов

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Во-первых, в состаренных монокристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ изменение скорости деформации с $V = 0,4 \times 10^{-2} c^{-1}$ до $V = 8 \times 10^{-2} c^{-1}$ (в 20 раз) не оказывает влияние на параметры СЭ, что важно для практического применения в случае неконтролируемой скорости нагрузки. Во-вторых, [001]-монокристаллы $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ проявляют хорошую циклическую стабильность СЭ: с 10 по 20 000 цикл σ_{cr} и $\Delta\sigma$ остаются постоянными, ε_{irr} не наблюдается. С 20 000 по 50 000 σ_{cr} и $\Delta\sigma$ медленно уменьшаются на 32 % и 15 %, соответственно, разрушение образца не достигается.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-19-10250

Литература

1. Yu. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Yu. Panchenko et. al High-temperature superelasticity in coniga, conial, nifega, and tini monocrystals // Russian Physics Journal. 2008, № 51, P. 1016-1036.
2. Y. Sutou, N. Kamiya, T. Omori et. al Stress-strain characteristics in Ni–Ga–Fe ferromagnetic shape memory alloys // Applied Physics Letters. 2004, № 84, P. 1275-1277.
3. C. Efstathiou, H. Sehitoglu, P. Kurath Fatigue response of NiFeGa single crystals // Scripta Materialia. 2007, №57, P. 409–412.
4. Q. Kan, C. Yu, G. Kang Experimental observations on rate-dependent cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy // Mechanics of Materials. 2016, №97, P. 48–58.
5. R. Ducher, R. Kainuma, K. Ishida, Phase equilibria in the Ni–Fe–Ga alloy system, // Journal of Alloys and Compounds. 2008, № 463, P. 213–219.