ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.
Томск, Россия

Томск – 2021
Издательство ТГУ

DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-129

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СОСТАРЕННЫХ В МАРТЕНСИТНОМ СОСТОЯНИИ ПОД СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКОЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ ФЕРРОМАГНИТНОГО СПЛАВА $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$

Курлевская И.Д., Тохметова А.Б., Панченко Е.Ю., Чумляков Ю.И.
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Ферромагнитные сплавы Гейслера на основе NiFeGa с термоупругими $L2_1$-10M/14M-$L1_0$ мартенситными превращениями (МП), в которых наблюдаются такие функциональные свойства как эффект памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичность (СЭ), являются одними из наиболее перспективных материалов для широкого практического применения в качестве датчиков, актуаторов и генераторов. В данных сплавах посредством изменения температуры, приложения внешней нагрузки и/или магнитного поля возможно получить обратимые деформации при сжатии до -6,25 % и при растяжении до +13,5 % при реализации ЭПФ и СЭ [1]. Управлять температурами МП, параметрами функциональных свойств материала, а также упростить механизмы их реализации за счет наведения двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ) возможно посредством термомеханической обработки – старения в мартенситном состоянии под сжимающей нагрузкой (СМН). Эффективность наведения ДЭПФ посредством СМН, заключающегося в стабилизации ориентированного варианта $L1_0$-мартенсита, показана в работах [2, 3]. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния СМН на функциональные свойства монокристаллов сплава $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$, ориентированного вдоль $[001]_{L21}$-направления.

Для исследования выбраны монокристаллы сплава $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$ в исходном состоянии после роста. СМН проводилось вдоль $[001]_{L21}$-ориентации. При развитии $L2_1$-10M/14M-$L1_0$ МП данная ориентация характеризуется максимальным теоретическим ресурсом деформации при сжатии (ε_0 = -6,25 %). Режим СМН заключался в выдержке в мартенситном состоянии (при T = 448 K в течение 1 ч под сжимающей нагрузкой $|\sigma|$ = 700 МПа при общей заданной деформации ε = 9,5 %), при котором в образце происходит стабилизация сдвойникованного ориентированного $L1_0$-мартенсита за счет происходящих в материале диффузионных процессов.

Экспериментально показано, что вдоль $[001]_{L21}$-направления после СМН вдоль того же направления наблюдается сжимающий ДЭПФ с величиной обратимой деформации ε = -5,2 % (см. рис. 1 а). Данная деформация составляет $0{,}83\varepsilon_0$ и реализуется в узком температурном интервале МП Δ_1 = 6 K, Δ_2 = 5 K ($\Delta_1 = M_s - M_f$, $\Delta_2 = A_f - A_s$) с термическим гистерезисом ΔT = 16 K.

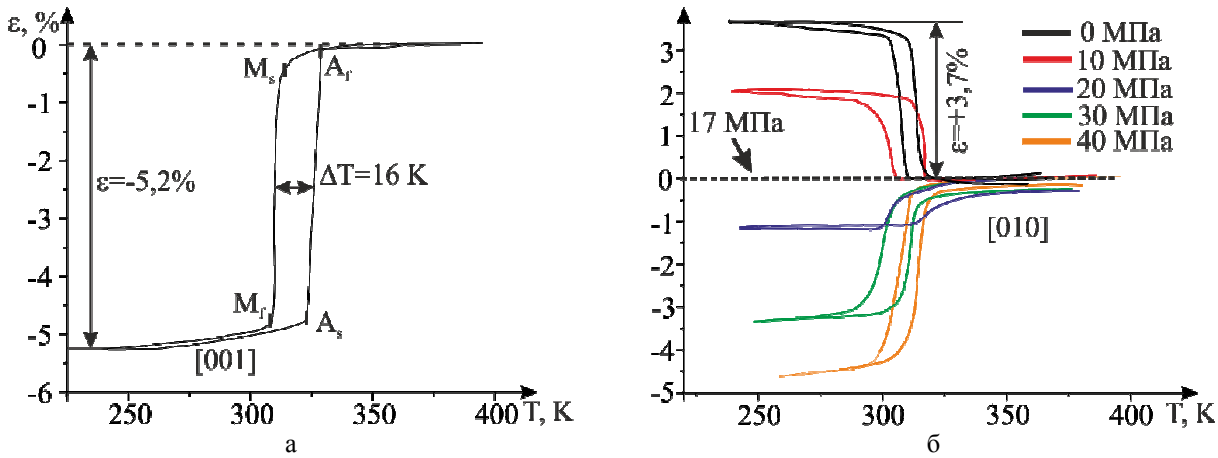

Рис. 1. ДЭПФ вдоль $[001]_{L21}$-направления (а) и кривые зависимости $\varepsilon(T)$ вдоль $[010]_{L21}$-направления (б) для монокристаллов $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$ после СМН

Вдоль $[100]_{L21}$- и $[010]_{L21}$-направления наблюдаются растягивающие ДЭПФ, где в первом случае обратимая деформация составляет ε = +2,4 % с ΔT = 15 K и $\Delta_1 = \Delta_2$ = 5 K, а во

втором – ДЭПФ характеризуется деформацией образца до $\varepsilon = +3{,}7$ % с $\Delta T = 7$ K и $\Delta_1 = 8$ K, $\Delta_2 = 7$ K (см. рис. 1 б). Вдоль $[010]_{L21}$-направления были проведены исследования в циклах охлаждение/нагрев под действием сжимающих напряжений, противодействующих увеличению размеров образца при проявлении растягивающего ДЭПФ. Под действием нагрузки $|\sigma| = 10$ МПа вдоль $[010]_{L21}$-направления деформация уменьшается до $\varepsilon = +2{,}1$ %. С последующим увеличением напряжений деформация меняет знак на противоположный. Деформация становится равной 0 при $|\sigma| \sim 17$ МПа. Значит, этих противодействующих напряжений достаточно, чтобы препятствовать росту стабилизированного варианта мартенсита при СМН.

На рисунке 2 представлены кривые СЭ вдоль $[001]_{L21}$-направления до и после СМН. Показано, что СМН вдоль $[001]_{L21}$-направления приводит к: 1) увеличению характеристических температур МП; 2) снижению критических напряжений образования мартенсита с $\sigma_{кр1} = 120$ МПа до $\sigma_{кр2} = 40$ МПа при T =333–338 K, с $\sigma_{кр1} = 231$ МПа до $\sigma_{кр2} = 123$ МПа при T = 373 K и с $\sigma_{кр1} = 425$ МПа до $\sigma_{кр2} = 341$ МПа при T = 448 K; 3) уменьшению величины механического гистерезиса $\Delta\sigma$ с 49 до 41 МПа при T = 373 K и с 55 до 44 МПа при T = 448 K.

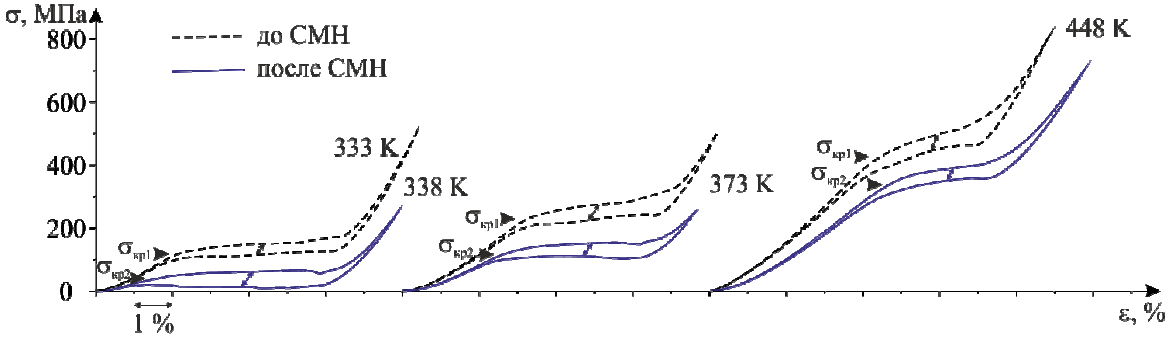

Рис. 2. Зависимость кривых σ(ε) от температуры испытания при проявлении эффекта СЭ для $[001]_{L21}$-монокристаллов $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$

Таким образом, в монокристаллах сплава $Ni_{54}Fe_{19}Ga_{27}$ СМН вдоль $[001]_{L21}$-направления приводит к получению необходимых характеристик для широкого практического применения данных сплавов: наблюдению ДЭПФ величиной $\varepsilon = -5{,}2$ % при охлаждении/нагреве в свободном состоянии; узким термическим 7–16 K и механическим 41–44 МПа гистерезисам при исследовании ДЭПФ и СЭ соответственно; уменьшению критических напряжений, необходимых для образования кристаллов мартенсита на 80–100 МПа, узким температурным интервалам МП порядка 5–8 K.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 20-19-00153.

1. Inter-martensitic transitions in Ni–Fe–Ga single crystals / R. F. Hamilton [et al.] // Acta Mater. 2007. V. 55. № 14. P. 4867–4876.
2. Otsuka K. Mechanism of martensite aging effects and new aspects / K. Otsuka, X. Ren // Mater. Sci. Eng. A. 2001. V. 312. P. 207–218.
3. Two-way shape memory effect and thermal cycling stability in the low-temperature stress-induced martensite aged $Co_{35}Ni_{35}Al_{30}$ single crystals / E. Panchenko [et al.] // Scripta Mater. 2018. V. 150. P. 18–21.