

СВЕРХЭЛАСТИЧНОСТЬ В СОСТАРЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВА FeMnAlNi

В.В. Поклонов

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Ю.И. Чумляков
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050
E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

SUPERHELASTICITY IN AGED SINGLE CRYSTALS OF FeMnAlNi ALLOY

V.V. Poklonov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. Yu.I. Chumlyakov
National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050
E-mail: poklonov_vyacheslav@mail.ru

Abstract. На [112]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ показано, что при старении при $T = 437$ К, 3 h наблюдается высокотемпературная сверхэластичность при деформации растяжением в температурном интервале от 298 К до 473 К. Экспериментально установлено, что механические и функциональные свойства зависят от ориентации кристалла, которая определяет вклад деформации раздвойникованием ϵ_{detw} в теоретическую величину деформации решетки.

Введение. Сплавы с памятью формы (СПФ) представляют собой уникальный класс материалов, которые при механической нагрузке/разгрузке проявляют большие обратимые изменения формы – сверхэластичность (СЭ), обусловленную термоупругими мартенситными превращениями (МП). В настоящее время интерметаллиды на основе NiTi являются наиболее применяемыми в промышленности СПФ, однако существует ряд проблем, связанных с созданием и обработкой заготовок, которые приводят к значительному удорожанию материала, и препятствуют его широкому использованию [1, 2]. СПФ на основе Fe являются альтернативой NiTi благодаря более низкой стоимости компонентов и простоты обработки. Особый интерес представляет сплав FeMnAlNi, разработанный в 2011 году [3], в котором наблюдается слабая температурная зависимость напряжений $\sigma_{кр}$, необходимых для начала развития МП под нагрузкой, способствующая проявлению СЭ в широком температурном интервале от 77 К до 513 К, а также необычный механизм термоупругого МП из высокотемпературного α (ОЦК) аустенита в γ' (ГЦК) мартенсита. В [001]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением обнаружена СЭ до 3,5 % в температурном интервале от 77 К до 513 К и слабая температурная зависимость $\sigma_{кр}$, характеризующаяся величиной $\alpha^{[001]} = d\sigma_{кр}/dT = 0,54$ МПа/К [4]. В работе [5] на [123]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением обнаружена СЭ до 7,8 %. В [001]- и [123]-ориентациях при деформации растяжением теоретическая величина деформации решетки ϵ_0 определяется суммой вкладов деформации образования сдвойникованной структуры мартенсита ϵ_{CVP} и деформации раздвойникованием γ' -мартенсита ϵ_{detw} , тогда как в [122]-кристаллах ϵ_0 определяется только деформацией ϵ_{CVP} и $\epsilon_0^{[122]} = \epsilon_{CVP} = 8$ % [3]. Целью настоящей работы является исследование высокотемпературной СЭ при деформации растяжением в [122]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ (ат.%) в температурном интервале от 298 К до 473 К.

Материалы и методы исследования. Монокристаллы сплава $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ (ат.%) выращивали в среде инертного газа методом Бриджмена. Ориентацию кристаллов определяли на дифрактометре ДРОН-3. Образцы для растяжения вдоль [122]-направления вырезали на электроискровом станке. После роста монокристаллы выдерживали в атмосфере инертного газа He при 1480 К, 1 час с последующей закалкой в воду. Для выделения наноразмерных частиц В2-фазы проводили старение в атмосфере He при температуре 473 К, 3 часа. Механические свойства исследовали на испытательной машине Instron 5969 при скорости деформации $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Результаты. Для исследования СЭ проводились два типа испытаний на растяжение: деформация до 2 % при различных температурах испытания от 298 до 473 К и эксперименты по циклированию при комнатной температуре. На рис. 1 представлены результаты исследования температурной зависимости критических напряжений $\sigma_{кр}$ для состаренных [122]-монокристаллов $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением. Видно, что с ростом температуры испытания происходит линейный рост $\sigma_{кр}$, который описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса [1]:

$$\alpha = \frac{d\sigma_{кр}}{dT} = -\frac{\Delta H}{\varepsilon_0 T_0} \quad (1)$$

Здесь ΔH – изменение энтальпии при γ - α' -МП; ε_0 – деформация превращения; T_0 – температура химического равновесия фаз. Значение величины $\alpha^{[122]}$, полученное для состаренных [122]-монокристаллов, составляет 0,53 МПа/К. Это значение равно величине $\alpha^{[001]}$, полученной в работе [4]. Также с ростом температуры испытания происходит слабое увеличение механического гистерезиса $\Delta\sigma$: при температуре 298 К $\Delta\sigma = 200$ МПа, а при увеличении температуры испытания до 473 К $\Delta\sigma$ увеличивается до 295 МПа.

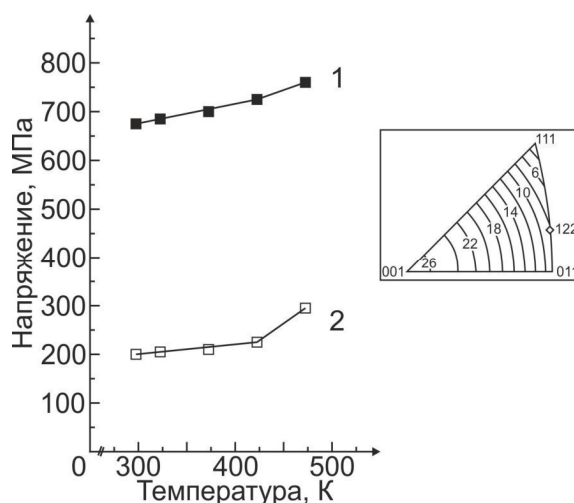


Рис. 1. Температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{кр}$ (кривая 1) и механического гистерезиса $\Delta\sigma$ (кривая 2) в состаренных [122]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением. На вставке указана исследуемая ориентация кристаллов [122], отклоненная от направления [110] на $11,5^\circ$, и теоретически рассчитанная величина ε_0

На рис. 2 представлена зависимость обратимой деформации и механического гистерезиса $\Delta\sigma$ от заданной деформации при исследовании СЭ при комнатной температуре для состаренных [122]-монокристаллов $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением. Видно, что величина $\varepsilon_{СЭ}$ линейно

возрастает с ростом заданной деформации. Максимальное значение СЭ при заданной величине деформации 4,5 % оказывается равным 4 %. При увеличении заданной деформации выше 4,5 % происходит хрупкое разрушение образца. Максимальное значение СЭ ограничивается пластичностью кристалла и не достигает величины ϵ_0 . Из рис. 2б видно, что значение механического гистерезиса при заданной величине деформации 2 % составляет $\Delta\sigma = 200$ МПа, а при $\epsilon = 4,5$ % увеличивается до 260 МПа. Величина $\Delta\sigma$ в [122]-монокристаллах при комнатной температуре равна величине, полученной в работе [3] для кристаллов, ориентированных вдоль направления [123], и меньше, чем в [001]-кристаллах, равной 350 МПа. Это связано с влиянием внешних напряжений на процессы раздвойнивания мартенсита в [001]-кристаллах и его отсутствием в [122]-кристаллах.

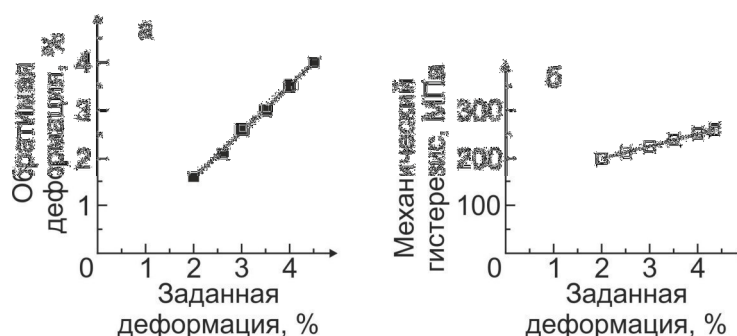


Рис. 2. Зависимость обратимой деформации (а) и механического гистерезиса $\Delta\sigma$ (б) от заданной деформации при температуре 298 К для состаренных [122]-монокристаллов $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением

Заключение. Таким образом, в состаренных [122]-монокристаллах $Fe_{43,5}Mn_{34}Al_{15}Ni_{7,5}$ при деформации растяжением, в которых ϵ_0 определяется только деформацией ϵ_{CVP} и раздвойнивания мартенсита не происходит, наблюдается температурная зависимость $\sigma_{кр}$ с малым коэффициентом $\alpha = 0,53$ МПа/К. Максимальное значение СЭ в [122]-кристаллах при комнатной температуре составляет 4%.

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsuka K. Shape memory materials / K. Otsuka, C. M. Wayman. – Cambridge University press, 1998. – 284 p.
2. Otsuka K. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys / Otsuka K., Ren X. // Progress in Materials Science. – 2005. – V.50. – P. 511 – 678.
3. Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys / T. Omori [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 333. – P. 68–71.
4. Superelastic response of a single crystalline FeMnAlNi shape memory alloy under tension and compression / L.W. Tseng [et al.] // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 89. – P. 374–383.
5. Effects of crystallographic orientation on the superelastic response of FeMnAlNi single crystals / L.W. Tseng [et al.] // Scripta Materialia. – 2016. – Vol. 116. – P. 147–151.