

Эффект памяти формы при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситном превращении в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si^{*}

И.В. Киреева¹, Ю.И. Чумляков¹, И.В. Куксгаузен¹, А.В. Федорова¹, Д.А. Куксгаузен¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

На [001]- и $\bar{1}\bar{1}7$ -монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si (мас.%) при растяжении исследовано развитие обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситного превращения (МП) под нагрузкой и величина обратимой деформации $\epsilon_{обр}$ при температуре 77 К при последовательном увеличении деформации в цикле «нагрузка – разгрузка» и нагреве в свободном состоянии. Показано, что при развитии обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП в [001]-кристаллах на температурной зависимости $\sigma_{0.1}(T)$ наблюдается вырождение стадии, связанной с образованием ϵ -мартенсита под нагрузкой. Величина обратимой деформации или эффекта памяти формы составила $\epsilon_{обр} = 2.2\text{--}2.3\%$ в [001]-кристаллах и $\epsilon_{обр} = 5\%$ в $\bar{1}\bar{1}7$ -кристаллах, которая оказалась значительно меньше, чем теоретическая величина деформации превращения при $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП для соответствующей ориентации при растяжении. Обсуждаются физические факторы, ограничивающие величину обратимой деформации в [001]- и $\bar{1}\bar{1}7$ -монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si.

Ключевые слова: монокристаллы, $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситное превращение, эффект памяти формы, растяжение.

Введение

Известно, что сплавы на основе железа Fe–Mn–Si с низкой величиной энергии дефекта упаковки (ДУ) $\gamma_0 \leq 19$ мДж/м² проявляют обратимое мартенситное превращение из γ -фазы (γ – гранцентрированная кубическая решетка) в ϵ -мартенсит (ϵ – гексагональная плотноупакованная решетка). ϵ -Мартенсит образуется при движении частичных дислокаций Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ через одну плотноупакованную плоскость $\{111\}_\gamma$ [1–3]. При развитии обратимого $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситного превращения (МП) в этих сплавах наблюдается эффект памяти формы (ЭПФ), который реализуется в результате образования ϵ -мартенсита под нагрузкой при движении частичной дислокации Шокли $a/6\langle 112 \rangle$ и ее обратным движением при нагреве после снятия нагрузки [1, 4–7].

Обратимое $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП при растяжении во всех ориентациях развивается с самого начала деформации, но при этом величина ЭПФ зависит от ориентации кристалла [4, 8–10]. Максимальный ЭПФ при растяжении при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП наблюдали в ориентации $\bar{1}\bar{1}44$ с максимальным фактором Шмида $m_\epsilon = 0.5$ для образования ДУ вычитания, который имел значение 8–9.2% в монокристаллах сплава Fe–30Mn–1Si (мас.%) [8] и 15.7% в монокристаллах высокоэнтропийного сплава Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co_{34.5}Ni_{5.5} (ат.%) [9]. В ориентации [001] с $m_\epsilon = 0.23$ ЭПФ при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП имел минимальное значение при растяжении: 0.5–1.2% в монокристаллах Fe–30Mn–1Si (мас.%) [8] и 3.6% в монокристаллах высокоэнтропийного сплава Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₃₅Ni₅ (ат.%) [10]. Ориентационная зависимость величины ЭПФ определялась числом развивающихся под нагрузкой вариантов ϵ -мартенсита: одним вариантом в ориентации $\bar{1}\bar{1}44$ и несколькими в ориентации [001] [8–10]. Кроме того, ранее на монокристаллах аустенитной нержавеющей стали Fe–17%Cr–12%Ni–2%Mn–0.75%Si с низкой $\gamma_0 \leq 22$ мДж/м² было показано, что кристаллы с осью растяжения [001] являются неблагоприятными для развития $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП [11]. В [001]-кристаллах при растяжении, во-первых, фактор Шмида для скольжения $m_{ск} = 0.41$ больше, чем фактор Шмида $m_\epsilon = 0.23$ для образования ДУ вычитания зародыша ϵ -мартенсита, и, во-вторых, величина расщепления полной винтовой дислокации $a/2\langle 110 \rangle$ на частичные дислокации Шокли $a/6\langle 211 \rangle$ для зарождения ДУ вычитания в этой ориентации уменьшается в поле внешних напряжений [11]. В результате макроскопически $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП в [001]-кристаллах при растяжении не развивалось, в отличие от других ориентаций, для которых $m_\epsilon \geq m_{ск}$ [11].

В настоящей работе ставилась задача исследовать ЭПФ в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si (мас.%) с $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ МП, ориентированных для растяжения вдоль направления [001] и $\bar{1}\bar{1}7$. Выбор сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si обусловлен следующим обстоятельством. Во-первых, в выбранном сплаве замена атомов Mn атомами Cr и Ni может приводить к увеличению уровня напряжений на пределе текучести $\sigma_{0.1}$ исходной γ -фазы по сравнению со сплавом Fe–30Mn–1Si

^{*} Результаты были получены за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00023, <https://rscf.ru/project/25-19-00023/>.