

## Эффект памяти формы при обратимом $\gamma \leftrightarrow \epsilon$ -мартенситном превращении в монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si<sup>\*</sup>

И.В. Киреева<sup>1</sup>, Ю.И. Чумляков<sup>1</sup>, И.В. Куксгаузен<sup>1</sup>, А.В. Федорова<sup>1</sup>, Д.А. Куксгаузен<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

На [001]- и [117]-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  $\varepsilon_{\text{обр}}$  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  $\epsilon$ -мартенсита под нагрузкой. Величина обратимой деформации или эффекта памяти формы составила  $\varepsilon_{\text{обр}} = 2.2\text{--}2.3\%$  в [001]-кристаллах и  $\varepsilon_{\text{обр}} = 5\%$  в [117]-кристаллах, которая оказалась значительно меньше, чем теоретическая величина деформации превращения при  $\gamma \rightarrow \epsilon$  МП для соответствующей ориентации при растяжении. Обсуждаются физические факторы, ограничивающие величину обратимой деформации в [001]- и [117]-монокристаллах сплава Fe–16Mn–10Cr–8Ni–4Si.

**Ключевые слова:** монокристаллы,  $\gamma \rightarrow \epsilon$ -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/м<sup>2</sup> проявляют обратимое мартенситное превращение из  $\gamma$ -фазы ( $\gamma$  – гранецентрированная кубическая решетка) в  $\epsilon$ -мартенсит ( $\epsilon$  – гексагональная плотноупакованная решетка).  $\epsilon$ -Мартенсит образуется при движении частичных дислокаций Шокли  $a/6<112>$  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  $\epsilon$ -мартенсита под нагрузкой при движении частичной дислокации Шокли  $a/6<112>$  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 [144] 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 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>34.5</sub>Ni<sub>5.5</sub> (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 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> (ат.%) [10]. Ориентационная зависимость величины ЭПФ определялась числом развивающихся под нагрузкой вариантов  $\epsilon$ -мартенсита: одним вариантом в ориентации [144] 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/м<sup>2</sup> было показано, что кристаллы с осью растяжения [001] являются неблагоприятными для развития  $\gamma \rightarrow \epsilon$  МП [11]. В [001]-кристаллах при растяжении, во-первых, фактор Шмида для скольжения  $m_{\text{ск}} = 0.41$  больше, чем фактор Шмида  $m_\epsilon = 0.23$  для образования ДУ вычитания зародыша  $\epsilon$ -мартенсита, и, во-вторых, величина расщепления полной винтовой дислокации  $a/2<110>$  на частичные дислокации Шокли  $a/6<211>$  для зарождения ДУ вычитания в этой ориентации уменьшается в поле внешних напряжений [11]. В результате макроскопически  $\gamma \rightarrow \epsilon$  МП в [001]-кристаллах при растяжении не развивалось, в отличие от других ориентаций, для которых  $m_\epsilon \geq m_{\text{ск}}$  [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 [117]. 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  $\gamma$ -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/>.