

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

**Сборник материалов
XVI Российской научной
студенческой конференции**

Томск, 17–20 апреля 2018 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Ориентационная зависимость механического поведения монокристаллов сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ при деформации растяжением*

А.В. Выродова¹, З.В. Победенная²

¹Томский государственный университет, г. Томск

²Сибирский физико-технический институт им. акад. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) – это класс металлических соединений, в котором за счет смешивания пяти и более элементов в равных атомных пропорциях достигается значительный эффект деформационного упрочнения в широком температурном интервале от 300 до 77 К, физическая природа которого до конца остается еще не выясненной [1]. В настоящей работе представлены исследования стадийности $\sigma(\varepsilon)$ -кривых течения, коэффициента деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и пластичности на монокристаллах ГЦК $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ сплава с энергией дефекта упаковки (ДУ) $\gamma_0 = 0,022$ Дж/м², ориентированных вдоль направлений [001], $[\bar{1}11]$ и $[\bar{1}23]$, при деформации растяжением.

Монокристаллы $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ были получены методом Бриджмена. Химический состав монокристаллов после роста и закалки определяли рентгенофлуоресцентным методом: Co = 10,47 %, Cr = 10,09 %, Fe = 40,28 %, Mn = 39,16 % (ат. %). Энтропия смешения полученных монокристаллов, определенная по соотношению

$$\Delta S^{\text{см}} = - R \sum_{i=1}^N c_i \ln c_i,$$

где R – универсальная газовая постоянная; c_i – атомное содержание i -го компонента в сплаве; N – число элементов, равна 9,97 Дж/(моль·К). Таким образом, согласно [2], монокристаллы данного сплава по количеству элементов и энтропии смешения относятся к классу среднеэнтропийных сплавов, но по своим механическим свойствам, как показали исследования на поликристаллах [3], они близки к классу высокоэнтропийных. Критические скалывающие напряжения для скольжения определяли, используя выражение $\tau_{\text{кр}}^{\text{ск}} = \sigma_{0,1} \cdot m_{\text{ск}}$ ($\sigma_{0,1}$ – осевые напряжения на пределе текучести, $m_{\text{ск}}$ – фактор Шмида для скольжения). Коэффициент деформационного упрочнения рассчитывали по формуле $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 16-19-10193.

На рис. 1 приведены кривые течения $\sigma(\varepsilon)$ для монокристаллов ГЦК $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ сплава трех ориентаций при 296 К.

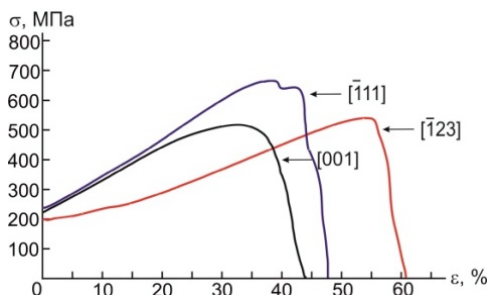


Рис. 1. Кривые течения $[\bar{1}11]$ -, $[\bar{1}23]$ -, $[001]$ - монокристаллов сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ при растяжении

Анализ данных, представленных на рис. 1, показывает, что $\tau_{\text{кр}}^{\text{СК}}$, стадийность кривых течения, коэффициент деформационного упрочнения Θ_{II} и пластичность зависят от ориентации кристалла.

В $[\bar{1}23]$ - и $[001]$ -монокристаллах $\tau_{\text{кр}}^{\text{СК}}$ оказываются близки по величине, а в $[\bar{1}11]$ -кристаллах ниже на 24 и 26 МПа соответственно (таблица). Таким образом, в кристаллах исследуемого сплава с $\gamma_0 = 0,022 \text{ Дж/м}^2$ закон Боаса – Шмида не выполняется, в отличие от монокристаллов $\text{Al}_{0,3}\text{CoCrFeNi}$ ВЭС с $\gamma_0 = 0,05 \text{ Дж/м}^2$, как было показано ранее в работе [4]. При исследовании дислокационной структуры в $[001]$ -кристаллах наблюдаются нерасщепленные дислокации, а в $[\bar{1}11]$ -кристаллах – расщепленные дислокации и дефекты упаковки. Следовательно, ориентационная зависимость $\tau_{\text{кр}}^{\text{СК}}$ определяется ориентационной зависимостью типа дислокационной структуры.

Механические свойства сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ при деформации растяжением в зависимости от ориентации оси кристалла

Ориентация	Механические свойства					
	$m_{\text{СК}}$	$\sigma_{0,1}$, МПа	$\tau^{\text{СК}} \pm 2$, МПа	θ_{II} , МПа	δ_{max}	σ_{B} , МПа
$[001]$	0,41	222 ± 5	90 ± 2	1107	44	517
$[\bar{1}11]$	0,27	236 ± 5	$64 \pm 1,5$	1114	47	665
$[\bar{1}23]$	0,45	196 ± 5	88 ± 2	660	61	540

Пластическое течение в $[001]$ - и $[\bar{1}11]$ -кристаллах развивается преимущественно в одну линейную стадию и имеет вид, типичный для ГЦК-кристаллов, ориентированных для множественного сдвига, при деформации растяжением. При $\varepsilon = 0,1\text{--}15\%$ Θ_{II} в этих кристаллах оказывается близким

(таблица), тогда как при $\varepsilon > 15\%$ в $[\bar{1}11]$ -кристаллах Θ_{II} возрастает. Увеличение Θ_{II} в $[\bar{1}11]$ -кристаллах, как показывают исследования дислокационной структуры, связано с двойникованием, которое при взаимодействии со скольжением приводит не только к росту Θ_{II} , но и к повышению уровня напряжений для разрушения (рис. 1, таблица) [5], в отличие от $[001]$ -кристаллов, где двойникования не наблюдается.

В отличие от $[001]$ - и $[\bar{1}11]$ -кристаллов, в $[\bar{1}23]$ -кристаллах на $\sigma(\varepsilon)$ кривой наблюдается классическая стадийность, характерная для кристаллов, ориентированных для одиночного сдвига: при $\varepsilon = 0,1\text{--}10\%$ – имеет место стадия I легкого скольжения с $\Theta_I = 370$ МПа, при $\varepsilon > 10\%$ – стадия II линейного упрочнения, где Θ_{II} увеличивается до 660 МПа и при $\varepsilon > 45\%$ происходит переход к стадии III динамического возврата с низким Θ_{III} . Как видно из таблицы, Θ_{II} в $[\bar{1}23]$ -кристаллах оказывается меньше, а пластичность, напротив, больше, чем в $[001]$ - и $[\bar{1}11]$ -кристаллах, ориентированных для множественного сдвига. Таким образом, исследования на монокристаллах $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ сплава показывают, что величина Θ_{II} и пластичность определяются числом систем сдвига и механизмом деформации – скольжением и двойникованием.

Авторы выражают благодарность своим руководителям гл.н.с. И.В. Киреевой и проф. Ю.И. Чумлякову за помощь в эксперименте и в обсуждении полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys // Progress in Materials Science – 2014. – V. 61. – P. 1–93.
2. Древаль Л.А., Агравал П.Г., Турчанин М.А. Высокоэнтропийные сплавы как материалы, имеющие в основе множество базовых элементов // Вестник ДГМА. – 2014. – № 1(32). – С. 58–64.
3. Deng Y., Tasan C.C., Pradeep K.G., et al. Design of a twinning-induced plasticity high entropy alloy // Acta Materialia – 2015. – V. 94. – P. 124–133.
4. Киреева И.В., Ю Чумляков И., Победенная З.В. и др. Ориентационная зависимость критических скалывающих напряжений в монокристаллах высокоэнтропийного сплава $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ // Письма в ЖТФ. – 2017. – Т. 43. – Вып. 13. – С. 51–57.
5. Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В. и др. Скольжение и двойникование в $[\bar{1}49]$ -монокристаллах высокоэнтропийного сплава // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 8. – С. 106–113.

Vyrodova A.V., Pobedennaya Z.V. Orientation dependence of the mechanical behavior of single crystals of $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ alloy under tensile strain

Выродова Анна Вячеславовна, студентка, virodova@mail.ru;

Победенная Зинаида Владимировна, н.с.; pobedennaya_zina@mail.ru