

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА ПРИ ДЕФОРМАЦИИ РАСТЯЖЕНИЕМ

А.В. ВYROДОВА, З.В. ПОБЕДЕННАЯ

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Сибирский физико-технический институт

E-mail: wirodowa@mail.ru

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) с ГЦК решеткой (ГЦК – гранецентрированная кубическая решетка) – это новый класс материалов, 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 $\sigma(\epsilon)$ -кривых течения, коэффициента деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\epsilon$ и пластичности в зависимости от температуры испытания на монокристаллах ВЭС FeNiCoCrAl_{0.3}, ориентированных вдоль [011] направления, при деформации растяжением. Величина энергии дефекта упаковки ВЭС FeNiCoCrAl_{0.3} равна 0.05 Дж/м² [2]. При данной величине энергии дефекта упаковки механизмом деформации, определяющим деформационное упрочнение, должно быть скольжение.

Монокристаллы ГЦК ВЭС FeNiCoCrAl_{0.3} были получены методом Бриджмена. Химический состав монокристаллов после роста и закалки определяли рентгенофлуоресцентным методом: Co = 23.36 %, Cr = 23.29 %, Fe = 23.80 %, Ni = 21.88 %, Al = 7.67 % (ат. %). Энтропия смешения полученных монокристаллов ВЭС, определенная по соотношению:

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

где R – универсальная газовая постоянная, c_i – атомное содержание i -ого компонента в сплаве, N – число элементов, равна 13 Дж/моль×К. Таким образом, согласно [3], монокристаллы данного сплава можно отнести к классу ВЭС. Механические испытания в интервале температур от 77 до 573 К проводили на испытательной машине Instron 5969.

На рисунке 1 приведены кривые течения $\sigma(\epsilon)$ для [011]-монокристаллов ВЭС FeNiCoCrAl_{0.3} в интервале температур от 77 К до 573 К. На кривых течения при всех температурах испытания деформация ϵ развивается в две стадии с различными значениями коэффициента деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\epsilon$. При $T = 423$ -573 К на $\sigma(\epsilon)$ кривых

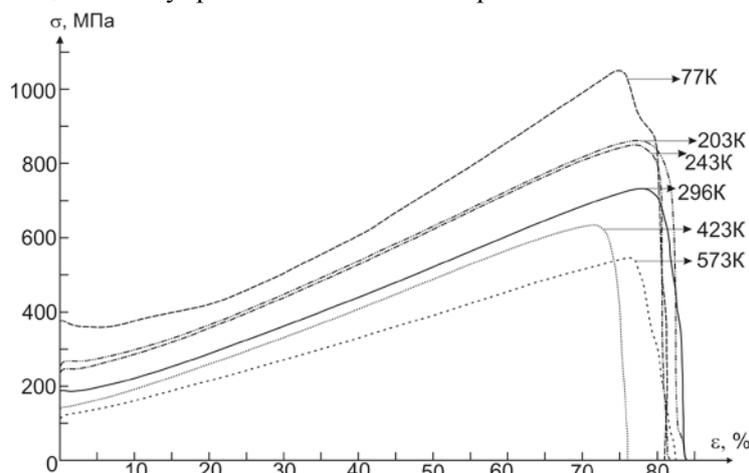


Рисунок 1 – Кривые течения [011]-монокристаллов высокоэнтропийного сплава FeNiCoCrAl_{0.3} при растяжении

Таблица 1 – Механические свойства высокоэнтропийного сплава FeNiCoCrAl_{0.3} при растяжении в зависимости от температуры испытания

Механические свойства	Температура испытания					
	77 К	203 К	243 К	296 К	423 К	573 К
$\Theta_{II} = d\sigma/d\varepsilon$, МПа	1153	904	898	794	752	600
пластичность ε , %	82	84	82	84	76	83

наблюдается стадия легкого скольжения до 7.5 % с малым Θ_I , а затем при $\varepsilon > 7.5$ % происходит переход к стадии линейного упрочнения с высоким Θ_{II} (таблица 1). С понижением температуры испытания при $T \leq 296$ К стадия легкого скольжения вырождается и деформация с начала развивается полосой Людерса-Чернова с равным нулю коэффициентом деформационного упрочнения Θ_I . Протяженность этой стадии с понижением температуры испытания возрастает. На поверхности образца, деформированного до конца полосы Людерса-Чернова, при всех исследованных температурах испытания наблюдается одна система скольжения. При завершении деформации полосой Людерса-Чернова происходит переход ко второй линейной стадии с высоким Θ_{II} . Из таблицы 1 видно, что с понижением температуры испытания Θ_{II} возрастает и максимальное его значение имеет место при температуре жидкого азота.

Металлографические исследования поверхности образцов, деформированных до 15-20 %, обнаруживают две системы скольжения, взаимодействие которых приводит к росту Θ_{II} . При этом одна система скольжения оказывается ярко выраженной, по сравнению с другой, что свидетельствует о локализации деформации преимущественно в одной системе. Методом электронной микроскопии установлено, что в исследуемом интервале температур деформационное упрочнение определяется скольжением, которое развивается в начале в одной системе, а затем в двух [4].

С понижением температуры испытания до 77 К, как видно из рисунка 1, наблюдается рост напряжений на пределе текучести $\sigma_{0.1}$ в 3.3 раза и напряжений для разрушения $\sigma_{раз}$ – в 2 раза относительно температуры испытания 573 К. При этом пластичность практически не зависит от температуры испытания и составляет 80-85 %. Физическая причина высокой пластичности связана с локализацией деформации преимущественно в одной системе, которая подавляет условия для образования шейки и приводит к значительному росту напряжений для разрушения.

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

Список литературы

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. Yasuda H.Y., Shigeno K., Nagase T. Dynamic strain aging of Al_{0.3}CoCrFeNi high entropy alloy single crystals // Scripta Mater. – 2015.– V. 108. P. 80-83.
3. Фирсов С.А. и др. Влияние пластической деформации на структуру и свойства высокоэнтропийных сплавов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. –2013. – Т. 18, вып. 14. – С. 178-181.
4. Киреева И.В., Чумляков Ю.И., Победенная З.В. и др. Скольжение и двойникование в [149]-монокристаллах высокоэнтропийного сплава // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – Т. 59, вып. 8. – С. 106-113.