

Сведения о выполненных работах в 2021 году  
по проекту «**Новые высокопрочные моно- и поликристаллы ГЦК  
высокоэнтропийных сплавов, упрочненные наночастицами: от  
фундаментальных исследований микроструктуры к механизмам  
деформации и механическим свойствам**»,  
поддержанному Российским научным фондом  
Соглашение № 19-19-00217

Руководитель Киреева Ирина Васильевна, д-р физ.-мат. наук

Впервые, на монокристаллах ВЭС (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub>, ориентированных вдоль [-111], [-144], [001] направлений, исследована кинетика дисперсионного твердения при 1173 К от 1 до 110 часов. Установлено, что при старении при 1173 К в течение 24 и 50 часов выделяются частицы двух фаз:  $\sigma$ - и  $\mu$ -фазы. Частицы  $\sigma$ -фазы имели размер: длина 2-3 мкм, ширина 0.3-0.5 мкм. Частицы  $\mu$ -фазы оказались наноразмерными со средним размером по длине 100-350 нм. Обе фазы оказались некогерентные, и их взаимодействие с дислокациями происходило по механизму огибания.

Впервые при деформации растяжением и сжатием исследована температурная зависимость критических скалывающих напряжений  $\tau_{кр}$  в широком температурном интервале  $T = 77-973$  К в закаленных и состаренных при 1173 К, 24 часа (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> монокристаллах. Установлено, что в закаленных и состаренных (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> монокристаллах начало пластического течения связано со скольжением и критические скалывающие напряжения  $\tau_{кр}$  при растяжении и сжатии не зависят от ориентации кристалла и в кристаллах одной ориентации не зависят от способа деформации растяжения/сжатия. Закон Боаса-Шмида постоянства критических скалывающих напряжений для скольжения  $\tau_{кр}$  в монокристаллах (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> при одной температуре испытания выполняется. Выделение некогерентных частиц  $\sigma$ - и  $\mu$ -фазы при старении при 1173 К от 1 до 110 часов не приводит к увеличению  $\tau_{кр}$  относительно закаленных кристаллов в температурном интервале 77-973 К. Это связано, с разупрочнением матрицы при выделении частиц и малой объемной долей частиц, вклад от которых в упрочнение не компенсирует разупрочнение матрицы при их выделении.

Установлено, что выделение некогерентных частиц  $\sigma$ - и  $\mu$ -фазы при старении при 1173К в течение 24 часов приводит к уменьшению величины энергии дефекта упаковки от 0.031 Дж/м<sup>2</sup> в закаленных кристаллах до 0.02 Дж/м<sup>2</sup> в состаренных за счет уменьшения концентрации Ni в матрице при выделении частиц. Это приводит к развитию двойникования в состаренных [111], [-144] кристаллах после небольшой деформации скольжением 3-5% при 296К.

Впервые при деформации растяжением установлено, что коэффициент деформационного упрочнения  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$  и пластичность  $\delta$  зависят от ориентации кристалла, температуры испытания и термической обработки. Максимальный коэффициент деформационного упрочнения  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon = 1850-1550$  МПа наблюдается

в закаленных [-111] кристаллах при  $T = 77-296$  К, что обусловлено развитием скольжения и двойникового в нескольких системах. В закаленных [-144] кристаллах при развитии пластической деформации вначале в одной системе скольжения, а затем в одной системе двойникового достигается максимальная пластичность 108 % при 77 К, которая в 2 раза превышает пластичность в [-111] и [001] кристаллах при этой температуре. При выделении частиц  $\sigma$ - и  $\mu$ -фазы  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$  в исследованных кристаллах увеличивается в 1.3-1.5 при  $T = 77$  К по сравнению с закаленными кристаллами, но пластичность уменьшается до 60-45 % в [-111] и [-144] кристаллах, а в [001] сохраняется на уровне 45%, как в исходных кристаллах без частиц. При  $T > 296$  К деформация развивается скольжением и  $\Theta/G(T)$  ( $G$  – модуль сдвига) в закаленных кристаллах слабо зависит от температуры испытания.

Впервые показано, что при выделении частиц  $\sigma$ - и  $\mu$ -фаз множественность двойникового (развитие двойникового в одной или нескольких системах) и его взаимодействие со скольжением определяют величину  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$  и его зависимость от температуры испытания в [-144] и [-111] кристаллах ВЭС (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub>. Максимальный  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon = 2250$  МПа при 77 К в [-111] кристаллах наблюдается при развитии двойникового со скольжением в нескольких системах и его уменьшение с повышением температуры испытания связано с развитием двойникового в одной системе одновременно со скольжением. В [-144] кристаллах при развитии двойникового преимущественно в одной системе со скольжением  $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$  оказывается меньше, чем в [-111] кристаллах и  $\Theta/G(T) \approx 16$  не зависит от температуры испытания в температурном интервале 77-473 К.

Впервые были получены «искусственные поликристаллы» ВЭС (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> путем введения высокой плотности нанодвойников при низкотемпературной деформации растяжением [-144] кристаллов до 65 % при 77 К и наноразмерных частиц  $\mu$ -фазы при последующем старении при 1173К в течение 24 часов деформированных кристаллов. При введении двойников и наноразмерных частиц  $\mu$ -фазы критические напряжения увеличились в 2 раза при 77К и в 2.5-3 раза в температурном интервале от 300 до 973 К по сравнению с исходными кристаллами. В результате при 77 К  $\sigma_{кр} \sim G/75$ , а при 973 К  $\sigma_{кр} \sim G/135$  ( $G$  – модуль сдвига) и, таким образом, полученные «искусственные поликристаллы» ВЭС (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> становятся высокопрочными материалами в широком температурном интервале от 77 до 973 К, к которым относят сплавы с пределом текучести равным  $G/100$ . В высокопрочных «искусственных поликристаллах» ВЭС (CoCrFeNi)<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> критические напряжения при  $T > 300$  К слабо зависят от температуры испытания и сохраняют пластичность до 25-30 % в температурном интервале от 296 до 973 К.