

Сведения о выполненных работах в 2019 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 д-р физ.-мат. наук Киреева Ирина Васильевна

Впервые, на монокристаллах высокоэнтропийного сплава $Al_{10.3}CoCrFeNi$ установлено, что старение при температуре 823К в течение 150 часов и при температуре 893К в течение 50 часов приводит к выделению когерентных частиц γ' -фазы, упорядоченной по типу L12. Частицы имеют квазиравноосную форму со средним размером $d=5-7$ нм и межчастинным расстоянием $L = 17-25$ нм. Показано, что отсутствие границ зерен в монокристаллах $Al_{10.3}CoCrFeNi$ подавляет процесс выделения частиц β -фазы при старении при 893К в течение 50 часов, которые при данном старении выделяются по границам зерен в поликристаллах этого сплава. Старение монокристаллов сплава $Al_{10.3}CoCrFeNi$ при 973К в течение 50 часов приводит к выделению некогерентных неравноосных частиц β -фазы, упорядоченной по типу B2, со средней длиной 300-350 нм и шириной 35-50 нм.

Впервые при растяжении исследована температурная зависимость критических скальвающих напряжений σ_{cr} в широком температурном интервале $T = 77-973K$ в закаленных $CrCoFeNi$ и $Al_{10.3}CoCrFeNi$ монокристаллах и состаренных $Al_{10.3}CoCrFeNi$ монокристаллах с частицами γ' - и β -фазы. Установлено, что в закаленных монокристаллах $CrCoFeNi$ и закаленных и состаренных $Al_{10.3}CoCrFeNi$ монокристаллах начало пластического течения связано со скольжением и критические скальвающие напряжения σ_{cr} при растяжении не зависят от ориентации кристалла и закон Боаса-Шмида постоянства критических скальвающих напряжений скольжения σ_{cr} при одной температуре испытания выполняется. Выделение когерентных частиц γ' -фазы приводит к увеличению σ_{cr} на 25-30 МПа, а некогерентных частиц β -фазы на 30-50 МПа в температурном интервале 77-973К.

Впервые при деформации растяжением исследована стадийность кривых течения, коэффициент деформационного упрочнения и разрушение закаленных монокристаллов $CrCoFeNi$. Установлено, что в закаленных монокристаллах эквивалентного сплава $CrCoFeNi$ при деформации растяжением коэффициент деформационного упрочнения на линейной стадии $d\sigma/d\epsilon$, удлинение до разрушения δ , максимальный уровень напряжений перед разрушением σ_{max} зависят от ориентации кристалла. Исследование дислокационной структуры показывают, что зависимость $d\sigma/d\epsilon$, δ , σ_{max} от ориентации кристалла и температуры испытания в монокристаллах сплава $CrCoFeNi$ связана с ориентационной зависимостью двойникования в этих кристаллах. Разрушаются монокристаллы сплава $CrCoFeNi$ вязко.

Впервые были созданы «искусственные поликристаллы» эквиатомного сплава CrCoFeNi путем введения высокой плотности нанодвойников при растяжении при 77К и последующего отжига при 893К в течение 50 часов. В результате введения нанодвойников в двух системах при низкотемпературной деформации [-111] кристаллов, $\sigma_{кр}$ в «искусственных поликристаллах» в высокотемпературной области при $T > 296К$ становятся равными $G/200$ и оказываются близкими к высокопрочным сплавам, у которых напряжения на пределе текучести равны $G/100$. Установлено, что в высокотемпературной области «искусственные поликристаллы», полученные при низкотемпературной деформации [-111] кристаллов, демонстрируют хорошую пластичность до 40% при высоком деформационном упрочнении 1800-2000 МПа и разрушаются вязко. Пластическая деформация «искусственных поликристаллов» после низкотемпературной деформации и отжига реализуется скольжением и двойникованием в одной системе при 77 и 296К, а двойники, введенные первоначально при низкотемпературной деформации, являются препятствиями для скользящих дислокаций и новых двойников, и это обеспечивает высокий коэффициент деформационного упрочнения $d\sigma/d\varepsilon$.

Впервые исследована стадийность кривых течения, коэффициент деформационного упрочнения $d\sigma/d\varepsilon$ и разрушение состаренных Al0.3CoCrFeNi монокристаллов. Установлено, что коэффициент деформационного упрочнения на линейной стадии $d\sigma/d\varepsilon$, удлинение до разрушения δ , максимальный уровень напряжений перед разрушением $\sigma_{макс}$ зависят от типа упорядоченных частиц γ' - и β -фазы и ориентации кристалла. Показано, что выделение частиц γ' -фазы приводит к уменьшению коэффициента деформационного упрочнения ($d\sigma/d\varepsilon$) в [-111] и [001] кристаллах относительно закаленных кристаллов. Физическая причина уменьшения $d\sigma/d\varepsilon$ в монокристаллах Al0.3CoCrFeNi при выделении когерентных частиц γ' -фазы связана с взаимодействием дислокаций с частицами по механизму срезания.

Некогерентные частицы β -фазы, напротив, активируют множественное скольжение, подавляют локализацию сдвига в одной системе, что обусловлено взаимодействием дислокаций с частицами β -фазы по механизму огибания. В этом случае пластическое течение развивается с высоким коэффициентом деформационного упрочнения. В [-111] кристаллах при 77К ($d\sigma/d\varepsilon$) = 3400 МПа и слабо меняется с ростом температуры испытания, а пластичность падает до 8-14 %. Высокие значения $d\sigma/d\varepsilon$ в [-111] кристаллах связаны с наличием дефектов упаковки и их взаимодействием с частицами. В [001] кристаллах при выделении частиц β -фазы дефектов упаковки нет, $d\sigma/d\varepsilon$ становится меньше, чем в [-111] кристаллах и пластичность сохраняется большой до 30%. Разрушаются монокристаллы Al0.3CoCrFeNi сплава с частицами γ' - и β - фазы вязко.

Впервые были созданы «искусственные поликристаллы» высокоэнтропийного сплава Al0.3CoCrFeNi путем введения высокой плотности нанодвойников при растяжении при 77К [-111] и [-144] кристаллов и наночастиц при последующем отжиге при 893К в течение 50 часов. После отжига при 893К в течение 50 часов деформированных [-111] и [-144] кристаллов происходит выделение частиц двух фаз

γ' - и β -фазы. Частицы обеих фаз имеют квазиравноосную форму. Частицы γ' -фазы $d = 5-7$ нм, а β -фазы $d = 30-40$ нм. Установлено, что при $T > 300\text{K}$ в «искусственных поликристаллах» за счет введения нанодвойников и наночастиц $\sigma_{\text{кр}} = G/150-G/200$ и, таким образом, «искусственные поликристаллы» сплава $\text{Al}_{10.3}\text{CoCrFeNi}$ оказываются близкими к высокопрочным сплавам в области высоких температур. При $T > 300\text{K}$ «искусственные поликристаллы» имеют пластичность 10-15 %, а при $T < 300\text{K}$ 5 %. При такой степени деформации уровень напряжений до разрушения достигается 500-600 МПа, соответственно при 973 и 773К; 800 МПа при 296-473К и 900-1010 МПа при 77К. Исследование дислокационной структуры свидетельствует о том, что пластическая деформация «искусственных поликристаллов» сплава $\text{Al}_{10.3}\text{CoCrFeNi}$, упрочненных нанодвойниками и наночастицами, происходит скольжением. Разрушаются «искусственные поликристаллы» сплава $\text{Al}_{10.3}\text{CoCrFeNi}$ при 77 и 296К вязко.