

Сведения о выполненных работах в 2020 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)₉₄Ti₂Al₄ исследована кинетика дисперсионного твердения при 1073К от 1 до 100 часов и старение при 923 К, 4 ч. Установлено, что при старении при 923К, 4ч и 1073К, 18 и 30 часов монокристаллов ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Ti₂Al₄ происходит выделение частиц γ' -фазы, упорядоченной по типу L12. При старении 923 К, 4 ч частицы имеют размер $d = 5-7$ нм, а при старении при 1073К, 18 и 30 часов $d = 20-22$ нм. Частицы γ' -фазы при исследованных временах старения имеют когерентное сопряжение с исходной матрицей и взаимодействие скользящих и двойникующих дислокаций происходит по механизму срезания.

Впервые при деформации растяжением и сжатием исследована температурная зависимость критических скалывающих напряжений σ_{cr} в широком температурном интервале $T = 77-973$ К в закаленных и состаренных (CoCrFeNi)₉₄Ti₂Al₄ монокристаллах. Установлено, что в закаленных и состаренных (CoCrFeNi)₉₄Ti₂Al₄ монокристаллах начало пластического течения связано со скольжением и критические скалывающие напряжения σ_{cr} 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 σ_{cr} в монокристаллах (CoCrFeNi)₉₄Ti₂Al₄ при одной температуре испытания выполняется. Выделение когерентных частиц γ' -фазы размером $d = 5-7$ нм приводит к увеличению σ_{cr} на 25-30 МПа, а размером $d = 20-22$ нм в 2–2.5 раза относительно закаленных кристаллов в температурном интервале 77-973К.

Впервые при деформации растяжением установлено, что коэффициент деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и пластичность δ в закаленных монокристаллах ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Ti₂Al₄ зависят от ориентации кристалла. Максимальный $\Theta = d\sigma/d\varepsilon = 2320$ МПа наблюдается в [-111] кристаллах. Выделение частиц γ' -фазы размером 20-22 нм (старение при 1073 К, 18 ч и 30 ч) приводит к увеличению $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ в 1.5 раза и уменьшению пластичности на 10 % и 20 % относительно закаленных кристаллов, но при этом их ориентационная зависимость сохраняется. Ориентационная зависимость Θ и δ определяется ориентационной зависимостью развивающейся дислокационной структуры и двойниковаия в этих кристаллах.

Показано, что увеличение напряжений на пределе текучести при выделении частиц γ' -фазы и уменьшение величины энергии дефекта упаковки

$\gamma_0 = 0.035-0.040$ Дж/м² за счет уменьшения концентрации атомов Al создают условия для развития деформации двойникованием в [-111] и [-144] кристаллах ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ после небольшой предшествующей деформации скольжением: 10-15 % при 296 К и 5-10 % при 77 К. Критические скалывающие напряжения для двойникования τ_{dv} зависят от ориентации кристалла, размера частиц γ' -фазы и температуры испытания. Наименьшие значения $\tau_{dv} = 170-160$ МПа обнаружены в [-144] кристаллах с максимальным фактором Шмида для двойникования $m_{dv} = 0.5$ при выделении частиц γ' -фазы размером 22 нм. Ориентационная зависимость τ_{dv} в монокристаллах ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ определяется ориентационной зависимостью факторов Шмида для двойникования, а температурная зависимость обусловлена температурной зависимостью критических скалывающих напряжений для скольжения, которое предшествует двойникованию и его множественностью.

Впервые установлено, что достижение высокого уровня деформирующих напряжений на пределе текучести при старении при 1073 К, 30 ч и развитие деформации двойникованием в [-111] и [-144] кристаллах ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ приводит к смешанному характеру разрушения с элементами вязкой и хрупкой компонент в температурном интервале 77-296 К. Физическая причина, приводящая к появлению хрупкой составляющей, связана с увеличением границы раздела «частица-матрица» с ростом размера частиц γ' -фазы при старении и увеличением интенсивности двойникования. Уменьшение уровня напряжений на пределе текучести при уменьшении размера частиц γ' -фазы и увеличении температуры испытания, а также уменьшение интенсивности развития двойникования или его отсутствие обеспечивают вязкий характер разрушения в монокристаллах ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ в широком температурном интервале от 77 до 973 К.

Впервые были получены «искусственные поликристаллы» ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ путем введения высокой плотности нанодвойников при низкотемпературной деформации растяжением при 77 К и последующего отжига при 923 К в течение 4 часов. Высокая плотность двойников в [-111] кристаллах достигалась при низкотемпературной деформации 20 %, а в [-144] кристаллах при 50 %. В результате введения нанодвойников $\sigma_{кр}$ в «искусственных поликристаллах» увеличиваются на 300 МПа в температурном интервале от 77 до 973 К и при 77 К $\sigma_{кр} \sim G/120$, а при 973 К $\sigma_{кр} \sim G/160$ (G – модуль сдвига). После старения деформированных при 77 К монокристаллов при 923 К в течение 4 часов $\sigma_{кр}$ дополнительно увеличиваются на 150 МПа и при 77 К $\sigma_{кр} \sim G/100$, а при 973 К $\sigma_{кр} \sim G/110$. Таким образом, полученные «искусственные поликристаллы» ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ в широком температурном интервале от 77 до 973 К становятся высокопрочными материалами, к которым относят сплавы с пределом текучести равным $G/100$. Показано, что в высокотемпературной области при $T > 600$ К $\sigma_{кр}$ в «искусственных поликристаллах» ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ слабо изменяются с ростом температуры испытания из-за отсутствия процессов зернограничного проскальзывания, поскольку двойники являются атермическими препятствиями и проскальзывания дислокаций по ним нет. В высокопрочном состоянии «искусственные поликристаллы» ВЭС (CoCrFeNi)₉₄Al₄Ti₂ сохраняют пластичность

до 10-15 %. По сравнению с исходными кристаллами пластичность уменьшилась в 5-7 раз (при 296 К в закаленных [-111] кристаллах пластичность достигала 48 %, а в закаленных [-144] кристаллах 70 %). Пластическая деформация «искусственных поликристаллов» ВЭС $(\text{CoCrFeNi})_{94}\text{Al}_4\text{Ti}_2$, упрочненных нанодвойниками и наночастицами, реализуется скольжением и разрушение при 77 и 296 К сохраняется вязким.