Сведения о выполненных работах в 2018 году
по проекту **«Механизмы деформации и разрушения моно- и поликристаллов новых высокоэнтропийных ГЦК-сплавов»,**
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 16-19-10193

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

Впервые, из монокристаллов ГЦК высокоэнтропийных сплавов $Fe_{23.25}Ni_{23.25}Cr_{23.25}Co_{23.25}Al_7$, $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$, $Fe_{40}Mn_{40}Cr_{10}Co_{10}$ (ат.%) с разной величиной энергии дефекта упаковки γДУ = 0.018–0.05 Дж/м^2, ориентированных вдоль [001], [111] и [123] направления, получены «искусственные поликристаллы» с размером зерна 150 мкм путем прокатки при 296К на 67% и последующего отжига при 1423К, 1 час. В полученных «искусственных поликристаллах» при прокатке монокристаллов [111] формируется текстура <012>{112}, а при прокатке монокристаллов [001] и [123] - <123>{111}.

Исследована стадийность кривых течения, коэффициент деформационного упрочнения и разрушение «искусственных поликристаллов» $Fe_{23.25}Ni_{23.25}Cr_{23.25}Co_{23.25}Al_7$, $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$, $Fe_{40}Mn_{40}Cr_{10}Co_{10}$ (ат.%) высокоэнтропийных сплавов при 77К и 296К. Показано, что при комнатной температуре испытания, не смотря на тот факт, что текстура в полученных «искусственных поликристаллах» отличается, напряжения на пределе текучести σ0.1, коэффициент деформационного упрочнения ΘII = dσ/dε, пластичность оказываются близкими для всех сплавов: σ0.1 = 200-220 МПа; ΘII = dσ/dε = 1450-1550 МПа; δ = 40-55%. При 77К коэффициент деформационного упрочнения увеличивается в 1.3-1.4 раза, а пластичность в 1.4-1.5 раза по сравнению с комнатной температурной испытания. Разрушаются «искусственные поликристаллы» вязко: при комнатной температуре с образованием трещин в теле зерна, а при 77К как по границам зерен, так и в теле зерна.

Впервые в «искусственных поликристаллах» эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава с текстурой <123>{111} и размером зерна 150 мкм обнаружено двойникование при 296К после деформации 30% при общей пластической деформации 50%, как и в [123] монокристаллах этого сплава, где двойникование развивается при 27% деформации. В «искусственных поликристаллах» этого сплава с текстурой <012>{112} и размером зерна 150 мкм двойникование при 296К не наблюдается до самого разрушения, поскольку в кристаллах данной ориентации фактор Шмида для скольжения mск = 0.49 оказывается больше, чем фактор Шмида для двойникования mдв = 0.4 и эта текстура является не благоприятной для деформации двойникованием. В «искусственных поликристаллах» с текстурой <123>{111} mск = mдв = 0.45 и, таким образом, геометрические условия для деформации скольжением и двойникованием оказываются одинаковыми и двойникование в них реализуется, как только для

двойникования в ходе пластической деформации достигается необходимый уровень напряжений. При температуре испытания 77К в «искусственных поликристаллах» эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава двойникование в одной системе наблюдается после 15% деформации во всех образцах независимо от текстуры. Это обусловлено, во-первых сильной температурной зависимостью σ0.1(T): σ0.1(77К)/σ0.1(296К) = 2-2.5 и, во-вторых, уменьшением величины энергии дефекта упаковки γДУ при понижении температуры испытания.

Установлено, что легирование монокристаллов эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава азотом концентрацией 0.6-0.8 ат.% и углеродом 0.5 ат.%, во-первых приводит к твердорастворному упрочнению: при комнатной температуре испытания эффект твердорастворного упрочнения составляет 45-50 МПа, а при температуре 77К 120-140 МПа и к усилению температурной зависимости: в [111] кристаллах без атомов азота отношение τкр(77К)/τкр(296К) = 1.8, а при легировании азотом и углеродом становится равным 2.6 и 2.4, соответственно. Во-вторых, легирование азотом концентрацией 0.6-0.8 ат.% и углеродом концентрацией 0.5 ат.% монокристаллов $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава приводит к повышению энергии дефекта упаковки γДУ: при легировании азотом до 0.03-0.034 Дж/м^2, а углеродом до 0.036-0.04 Дж/м2, тогда как исходная величина энергии дефекта упаковки $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ сплава без атомов внедрения равна 0.019-0.022 Дж/м^2.

Впервые при деформации растяжением исследована температурная зависимость критических скалывающих напряжений τкрск в [111], [001], [123] монокристаллах эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава дополнительно легированного азотом концентрацией 0.6-0.8 ат.% и углеродом 0.5 ат.% в широком температурном интервале T = 77-573К. Температурная зависимость τкрск(T) монокристаллов $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава с азотом и углеродом оказывается типичной для деформации скольжением ГЦК-твердых растворов замещения, критические скалывающие напряжения для скольжения τкрск при растяжении не зависят от ориентации кристалла и закон Боаса-Шмида постоянства критических скалывающих напряжений для скольжения τкрск при одной температуре испытания выполняется.

При легировании азотом и углеродом [001], [111] и [123] монокристаллов эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава планарная дислокационная структура с плоскими скоплениями дислокаций наблюдается в широком температурном интервале: при легировании азотом от 77К до 423К, а углеродом от 77К до 296К. Наблюдаемое различие в дислокационной структуре при 423К – отсутствие плоских скоплений в монокристаллах $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ сплава с углеродом и их наличие с азотом – связано с различием в подвижности атомов азота и углерода при температуре 423К и их влиянием на разрушение и восстановление ближнего порядка в расположении атомов.

Установлено, что при легировании монокристаллов эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co20$ высокоэнтропийного сплава азотом концентрацией 0.6-0.8 ат.% и углеродом концентрацией 0.5 ат.% деформация двойникованием при растяжении развивается только при температуре 77К: в [111] кристаллах после 10% деформации, а [001] после 20% деформации. При температуре испытания 296К двойникование в [111] кристаллах наблюдается только перед разрушением, тогда как в кристаллах данной ориентации без атомов внедрения двойникование развивается при 296К после 5%. Подавление развития двойникования с начала пластического течения в [111] монокристаллах Fe20Ni20Mn20Cr20Co20 высокоэнтропийного сплава с атомами внедрения при 296К обусловлено повышением энергии дефекта упаковки сплава при легировании азотом и углеродом.

Впервые на [144] и [011] монокристаллах эквиатомного $Fe_{20}Ni_{20}Mn_{20}Cr_{20}Co_{20}$ высокоэнтропийного сплава с максимальным фактором Шмида для двойникования mдв = 0.5 и mдв = 0.47, соответственно, установлено влияние деформационного двойникования на характер разрушения. При температуре испытания 77К в [144] обнаружен смешанный характер разрушения, а именно, наблюдается скол в сочетании с отрывом. Доля хрупкой составляющей поверхности разрушения в [144] кристаллах превышает вязкую компоненту. В [011] кристаллах при 77К характер разрушения вязкий. Показано, что физическая причина появления хрупкой составляющей поверхности разрушения в [144] кристаллах связана с развитием двойникования в нескольких системах при $\varepsilon \geq 15\%$ и при этом малой порцией скольжения, которого не достаточно для релаксации напряжений в вершине трещины, возникающей при пересечении двойников друг с другом. При развитии двойникования в одной системе одновременно со скольжением в [011] кристаллах при 77К и в [144] и [011] кристаллах при T > 77К разрушение вязкое, поскольку при взаимодействии скольжения с двойникованием напряжения в вершине трещины притупляются.

Разработана концепция высокопрочного состояния ГЦК высокоэнтропийных сплавов, которая позволяет объяснить ориентационную зависимость механического поведения монокристаллов высокоэнтропийных сплавов при деформации растяжением. Высокопрочное состояние ($\sigma 0.1 = G/100$) в ГЦК высокоэнтропийных сплавах достигается в результате сильной температурной зависимости $\sigma 0.1(77К)/\sigma 0.1(296К) = 2\text{-}2.5$, легированием атомами алюминия, азота и углерода. В основе этой концепции лежит достижение высокого уровня напряжений, который оказывает влияние на структуру индивидуальных дислокаций в поле внешних напряжений (ее расщепленность) и ее зависимость от ориентации кристалла, что приводит к появлению «нетипичных» для низкопрочных ГЦК сплавов особенностей деформации: перехода от скольжения к двойникованию с ранних стадий пластического течения, появлению ориентационной зависимости критических скалывающих напряжений τкр для скольжения и двойникования, типа развивающейся дислокационной структуры, коэффициента деформационного упрочнения и механизма разрушения.