Сведения о выполненных работах в 2016 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 на монокристаллах ГЦК высокоэнтропийных сплавов Fe23.25Ni23.25Cr23.25Co23.25Al7 Fe20Ni20Mn20Cr20Co20, Fe40Mn40Cr10Co10 (ат. %) с разной величиной энергии дефекта упаковки γДУ=0.018–0.05 Дж/м2, ориентированных для деформации растяжением вдоль [001], [111] и [123] направлений, исследована стадийность кривых течения и коэффициент деформационного упрочнения в широком температурном интервале. Показано, что стадийность кривых течения и деформационное упрочнение в монокристаллах ГЦК высокоэнтропийных сплавов определяется числом действующих систем сдвига, типом развивающейся дислокационной структуры и механизмом деформации – скольжением и двойникованием. Максимальный коэффициент деформационного упрочнения обнаружен в [111] кристаллах при температурах испытания ниже комнатной, когда деформационное упрочнение обусловлено развитием двойникования одновременно со скольжением в нескольких системах.

На монокристаллах ГЦК высокоэнтропийных сплавов Fe23.25Ni23.25Cr23.25Co23.25Al7 Fe20Ni20Mn20Cr20Co20, Fe40Mn40Cr10Co10 при деформации растяжением исследована дислокационная структура и механизм деформации – скольжение, двойникование. Показано, что тип структуры, механизм деформации при деформации растяжением в монокристаллах высокоэнтропийных сплавов зависят от величины энергии дефекта упаковки γДУ, ориентации оси кристалла и температуры испытания. В монокристаллах эквиатомного высокоэнтропийного сплава Fe20Ni20Mn20Cr20Co20, деформированных до 5 % при T=296 К, дислокационная структура зависит от ориентации кристалла: в [123] кристаллах дислокационная структура планарная с плоскими скоплениями дислокаций, тогда как в [001] и [111] кристаллах плоских скоплений дислокаций не наблюдается, дислокационная структура клубковая и состоит из сплетений дислокаций. Ориентационная зависимость дислокационной структуры при комнатной температуре испытания на ранних стадиях деформации в монокристаллах эквиатомного высокоэнтропийного сплава определяется множественностью сдвига. В монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe40Mn40Cr10Co10, в отличие от эквиатомного сплава Fe20Ni20Mn20Cr20Co20, деформированных до 5-10 % при температуре 296 К дислокационная структура не зависит от ориентации оси кристалла и во всех ориентациях оказывается планарной с плоскими скоплениями дислокаций. Различие в дислокационной структуре при комнатной температуре испытания двух высокоэнтропийных сплавов при близком уровне сил трения связано с более низкой величиной энергии дефекта упаковки γДУ в кристаллах

Fe40Mn40Cr10Co10 за счет отсутствия атомов никеля, который, как правило, приводит к увеличению γДУ. С повышением уровня напряжений за счет сильной температурной зависимости во всех исследуемых трех ориентациях эквиатомного и четверного высокоэнтропийных сплавов наблюдается планарная дислокационная структура с плоскими скоплениями дислокаций.

В [001], [111] и [123] монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe23.25Ni23.25Cr23.25Co23.25Al7 с γДУ=0.05 Дж/м2 планарная дислокационная структура с плоскими скоплениями дислокаций наблюдается в широком температурном интервале от 77 К до 423 К. Показано, что планарная дислокационная структура с плоскими скоплениями дислокаций в монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe23.25Ni23.25Cr23.25Co23.25Al7 сохраняется вплоть до самого разрушения. Фактором, определяющим сохранение планарной структуры с плоскими скоплениями дислокаций до самого разрушения кристаллов и при высоких температурах является сильный эффект твердорастворного упрочнения от атомов Al в результате большего значения его эффективного радиуса по сравнению с другими элементами, входящими в состав высокоэнтропийных сплавов.

Деформация двойникованием при растяжении в монокристаллах высокоэнтропийных сплавов зависит от величины энергии дефекта упаковки γДУ, ориентации оси кристалла и температуры испытания. В [111] монокристаллах высокоэнтропийных сплавов Fe20Ni20Mn20Cr20Co20 и Fe40Mn40Cr10Co10 с низкой γДУ двойникование при комнатной температуре испытания наблюдается при 5 % деформации, а в [123] при 27% и 15%, соответственно. С понижением температуры испытания деформация двойникованием смещается к началу пластического течения кристаллов. В монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe23.25Ni23.25Cr23.25Co23.25Al7 с высокой γДУ двойникование наблюдается только в кристаллах с осью растяжения [111] при 77К после деформации 15 %. В [111] и [123] кристаллах зарождение и рост двойников происходит по типу дефектов упаковки вычитания в результате расщепления полных дислокаций a/2<110> на частичные дислокации Шокли a/6<112>.

Впервые в [001]- монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe20Ni20Mn20Cr20Co20 при температуре жидкого азота при деформации растяжением 5% обнаружены дефекты упаковки внедрения и двойникование. Вклад в деформационное упрочнение двойникования в [001]- монокристаллах высокоэнтропийного сплава близок вкладу в деформационное упрочнение двойникования в [111] кристаллах. На основе исследований дислокационной структуры предполагается, что зарождение дефектов упаковки внедрения и двойникования в [001]- монокристаллах высокоэнтропийного сплава Fe20Ni20Mn20Cr20Co20 при температуре жидкого азота с начала деформации растяжением 5% происходит по механизму «скользящего источника» Copley-Kear-Byun при «перерасщеплении» полной дислокации b на частичные Шокли b1 → b2 в первичной системе скольжения, при котором последовательность частичных дислокаций от b1 → b2 меняется к b2 → b1 с образованием дефекта упаковки

внедрения. Физическая причина, способствующая «перерасщеплению» полной дислокации b на частичные Шокли b2 → b1 с образованием дефекта упаковки внедрения при растяжении в этих кристаллах, связана с высоким уровнем сил трения, который достигается за счет сильной температурной зависимости критических скалывающих напряжений, «геометрическим фактором» поджатия полоски дефекта упаковки относительно исходного состояния и внутренними полями напряжений от плоского скопления дислокаций при развитии планарной структуры. Отсутствие плоских скоплений в дислокационной структуре и облегчение процессов поперечного скольжения подавляет образование дефектов упаковки внедрения и двойникования в [001]- монокристаллах эквиатомного высокоэнтропийного сплава при комнатной температуре.

Таким образом, на монокристаллах высокоэнтропийных сплавов с низкой величиной энергии дефекта упаковки впервые обнаружено, что при растяжении в них зарождение и рост двойников при температуре жидкого азота с ранних стадий пластической деформации, 5 %, может происходить по типу дефектов упаковки вычитания в ориентациях близких к [111] и в [111] ориентации и по типу дефектов упаковки внедрения в [001] ориентации. Необходимые условия для реализации двойникования по типу дефектов упаковки вычитания и внедрения реализуются за счет сочетания низкой величины энергии дефекта упаковки, ее уменьшения в поле внешних напряжений, высокого уровня напряжений из-за сильной температурной зависимости критических скалывающих напряжений и развития планарной дислокационной структуры.

Исследован механизм разрушения в [001], [111] и [123] монокристаллах высокоэнтропийных сплавов. Установлено, что монокристаллы высокоэнтропийных сплавов не зависимо от их состава, ориентации кристалла и температуры испытания разрушаются вязко, как ГЦК чистые металлы и их сплавы замещения. Показано, что при температуре жидкого азота даже при развитии деформации двойникованием, которое приводит к росту коэффициента деформационного упрочнения, на поверхности разрушения наблюдается типичный для вязкого разрушения чашечный узор. Вязкий характер разрушения определяет скольжение, которое развивается в процессе деформации одновременно с двойнникованием и приводит к релаксации напряжений, возникающих в головах двойников.