

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2022 году

по проекту «Термоупругое ГЦК-ГПУ мартенситное превращение и
высокотемпературный эффект памяти формы в моно- и поликристаллах
новых неэквивалентных ГЦК-высокоэнтропийных сплавах
Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co_{40-x}Ni_x (X = 3, 5, 7, 10)»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-19-00016

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

Впервые получены монокристаллы Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₃₅Ni₅ ВЭС, в которых развивалось термоупругое γ - ϵ МП при охлаждении и нагреве в свободном состоянии и под нагрузкой. Температура начала γ - ϵ МП при охлаждении M_s составила 240 К. γ - ϵ МП в свободном состоянии и под нагрузкой характеризуется широким температурным гистерезисом. При охлаждении и нагреве в свободном состоянии температурный гистерезис $\Delta T_h = A_f - M_s = 160$ К. Под растягивающей нагрузкой температурный гистерезис зависит от уровня внешних напряжений $\sigma_{вн}$. В условиях изобарической деформации при $\sigma_{вн} = 210$ МПа $\Delta T_h = A_f - M_s = 180-195$ К в [001] и [-111] кристаллах и 140 МПа в [-144] кристаллах при $\sigma_{вн} = 150$ МПа.

Впервые показано, что в монокристаллах Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₃₅Ni₅ ВЭС при деформации растяжением температурная зависимость критических напряжений $\sigma_{кр}(T)$ имеет вид, характерный для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой и состоит из трех стадий. Первая стадия при $T < M_s$ связана с термически-активируемым движением двойниковых и межфазных границ. Вторая в температурном интервале $M_s < T < M_d$, на которой наблюдается линейный рост напряжений $\sigma_{кр}$ с ростом температуры, связана с развитием под нагрузкой γ - ϵ МП и описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса. Эта стадия развивается в очень узком температурном интервале, который зависит от ориентации кристалла. В [001] кристаллах температурный интервал второй стадии составляет 60 К, в [-144] – 87К, а в [-111] – 120 К. На этой стадии величина $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$ зависит от ориентации и ее ориентационная зависимость в полном соответствии с соотношением Клапейрона-Клаузиуса определяется ориентационной зависимостью теоретической величины деформации превращения $\epsilon_{пр}$ для γ - ϵ МП при растяжении. В [001] кристаллах с наименьшим значением $\epsilon_{пр} = 8\%$ величина $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$ имеет максимальное значение 1.7 МПа/К по сравнению с [-111] и [-144] кристаллами. В [-144] кристаллах с максимальным значением $\epsilon_{пр} = 17.5\%$ величина $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$ имеет наименьшее значение 0.5 МПа/К. В [-111] кристаллах при $\epsilon_{пр} = 10.8\%$ $\alpha = d\sigma_{кр}/dT = 0.75$ МПа/К. Третья стадия, связанная с деформацией γ -фазы, имеет место при температуре выше M_d . На этой стадии $\sigma_{кр}$ уменьшаются с увеличением температуры испытания.

Впервые при деформации растяжением установлено, что в монокристаллах Cr₂₀Mn₂₀Fe₂₀Co₃₅Ni₅ ВЭС коэффициент деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\epsilon$ и пластичность δ зависят от ориентации кристалла, температуры испытания. Показано, что ориентационная зависимость $\Theta = d\sigma/d\epsilon$ и пластичности δ определяется

механизмом деформации. Максимальный коэффициент деформационного упрочнения $\Theta = d\sigma/d\varepsilon = 3360-3500$ МПа и минимальная пластичность $\delta = 10-14$ % наблюдаются в $[-111]$ и $[001]$ кристаллах при 77 К, когда γ - ε МП развивается с самого начала в нескольких системах. Локализация γ - ε МП преимущественно в одной системе при температуре M_s и смена механизма деформации от γ - ε МП к развитию деформации двойникованием и скольжением при температуре M_d и выше M_d приводит к уменьшению $\Theta = d\sigma/d\varepsilon$ и увеличению пластичности. Установлено, что при развитии γ - ε МП, двойникования и скольжения в одной системе, соответственно при температурах 77 К, M_s , M_d и выше M_d в $[-144]$ кристаллах наблюдается наименьшее значение $\Theta = d\sigma/d\varepsilon = 600$ МПа и максимальная пластичность $\delta = 40-80$ %.

Впервые показано, что монокристаллы $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС при 77 К и M_s разрушаются хрупко. Хрупкое разрушение обусловлено подавлением развития пластической деформации скольжением и двойникованием в результате высокого уровня напряжений из-за аномальной температурной зависимости критических напряжений $\sigma_{cr}(T)$. С повышением температуры испытания при $T >$ или $= M_d$, когда пластическая деформация скольжением и двойникованием не подавлена происходит смена механизма разрушения от хрупкого к вязкому.

Впервые в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС с термоупругим γ - ε МП обнаружен ЭПФ при растяжении, который зависит от ориентации кристалла, температуры испытания, условий изучения ЭПФ (изотермической или изобарической деформации). В условиях изотермической деформации максимальная величина ЭПФ 13.8 % обнаружена в $[-144]$ кристаллах, а минимальная 3.6 % в $[001]$ кристаллах. В $[-111]$ кристаллах ЭПФ имеет промежуточное значение 6.8 %. В условиях изобарической деформации при $\sigma = \text{const}$ величина ЭПФ определяется уровнем внешних растягивающих напряжений и с ростом напряжений ЭПФ возрастает. В $[-144]$ кристаллах впервые обнаружен ЭПФ величиной 16.4 % при внешних напряжениях $\sigma_{вн} = 150$ МПа. Экспериментальная величина ЭПФ во всех ориентациях оказалась меньше, чем теоретическая величина деформации решетки $\varepsilon_{пр}$ для γ - ε МП в кристаллах соответствующей ориентации при растяжении. Показано, что недостижение ЭПФ при растяжении теоретической величины $\varepsilon_{пр}$ для γ - ε МП в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС при растяжении связано с развитием ε -мартенсита одновременно в нескольких системах, малым температурным интервалом для образования ε -мартенсита под нагрузкой и высоким уровнем напряжений для реализации γ - ε МП под нагрузкой.

Впервые показано, что кристаллы ε -мартенсита оказываются тонкими и имеют толщину 20–25 нм. На толщину ε -мартенсита, как и на двойники влияет ближний порядок, поскольку он оказывает дополнительное сопротивление движению частичных $a/6 \langle 211 \rangle$ дислокаций Шокли при прямом γ - ε МП под нагрузкой. ε -мартенсит образуется путем наложения дефектов упаковки друг на друга. Впервые в $[001]$, $[-111]$ и $[-144]$ монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС после 5 % деформации при температуре M_d , 473 и 573 К обнаружены дефекты упаковки и двойники. Двойникование в $[001]$, $[-111]$ и $[-144]$ кристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$ ВЭС является высокотемпературным механизмом деформации, так как наблюдается при температуре выше 300 К после небольшой деформации 5 %.