

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  
Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>40-x</sub>Ni<sub>x</sub> (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 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> ВЭС, в которых развивалось термоупругое  $\gamma$ - $\epsilon$  МП при охлаждении и нагреве в свободном состоянии и под нагрузкой. Температура начала  $\gamma$ - $\epsilon$  МП при охлаждении  $M_s$  составила 240 К.  $\gamma$ - $\epsilon$  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 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> 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  $\gamma$ - $\epsilon$  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  $\gamma$ - $\epsilon$  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  $\gamma$ -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 Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> ВЭС коэффициент деформационного упрочнения  $\Theta = d\sigma/d\epsilon$  и пластичность  $\delta$  зависят от ориентации кристалла, температуры испытания. Показано, что ориентационная зависимость  $\Theta = d\sigma/d\epsilon$  и пластичности  $\delta$  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  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП развивается с самого начала в нескольких системах. Локализация  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП преимущественно в одной системе при температуре  $M_s$  и смена механизма деформации от  $\gamma$ - $\varepsilon$  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  $\gamma$ - $\varepsilon$  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  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$  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  $\sigma_{кр}(T)$ . 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  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$  ВЭС с термоупругим  $\gamma$ - $\varepsilon$  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  $\sigma = const$  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  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП в кристаллах соответствующей ориентации при растяжении. Показано, что недостижение ЭПФ при растяжении теоретической величины  $\varepsilon_{пр}$  для  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП в монокристаллах  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$  ВЭС при растяжении связано с развитием  $\varepsilon$ -мартенсита одновременно в нескольких системах, малым температурным интервалом для образования  $\varepsilon$ -мартенсита под нагрузкой и высоким уровнем напряжений для реализации  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП под нагрузкой.

Впервые показано, что кристаллы  $\varepsilon$ -мартенсита оказываются тонкими и имеют толщину 20–25 нм. На толщину  $\varepsilon$ -мартенсита, как и на двойники влияет ближний порядок, поскольку он оказывает дополнительное сопротивление движению частичных  $a/6 \langle 211 \rangle$  дислокаций Шокли при прямом  $\gamma$ - $\varepsilon$  МП под нагрузкой.  $\varepsilon$ -мартенсит образуется путем наложения дефектов упаковки друг на друга. Впервые в  $[001]$ ,  $[-111]$  и  $[-144]$  монокристаллах  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$  ВЭС после 5 % деформации при температуре  $M_d$ , 473 и 573 К обнаружены дефекты упаковки и двойники. Двойникование в  $[001]$ ,  $[-111]$  и  $[-144]$  кристаллах  $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{35}Ni_5$  ВЭС является высокотемпературным механизмом деформации, так как наблюдается при температуре выше 300 К после небольшой деформации 5 %.