

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «Термоупругое ГЦК-ГПУ мартенситное превращение и
высокотемпературный эффект памяти формы в моно- и поликристаллах
новых неэквивалентных ГЦК-высокоэнтропийных сплавах
 $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{40-x}\text{Ni}_x$ ($x = 3, 5, 7, 10$)»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-19-00016

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

Впервые получены монокристаллы $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС с обратимым ГЦК-ГПУ МП при охлаждении и нагреве в свободном состоянии и под нагрузкой. ГЦК-ГПУ МП при охлаждении/нагреве в свободном состоянии характеризуется широким термическим гистерезисом $\Delta T = A_f - M_s = 189-194$ К. Температура Мн для начала прямого ГЦК-ГПУ перехода зависит от концентрации никеля в ВЭС и с увеличением концентрации никеля уменьшается, что связано с влиянием никеля на стабилизацию ГЦК-фазы: при концентрации никеля 3 ат. % $M_n = 295 \pm 5$ К, а при концентрации никеля 7 ат. % $M_n = 172 \pm 5$ К.

Впервые показано, что в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС ГЦК-ГПУ МП развивается под нагрузкой. На температурной зависимости $\sigma_{0.1}(T)$ наблюдаются три стадии, характерные для сплавов, испытывающих МП под нагрузкой. При концентрации никеля 3 ат. % температуры $M_n = 295$ К и $M_d = 350-400$ К смещены в область высоких температур по сравнению с концентрацией никеля 7 ат. %, где $M_n = 173$ К и $M_d = 250-300$ К. В температурном интервале $M_n < T < M_d$ наблюдается линейная зависимость $\sigma_{0.1}(T)$, которая связана с образованием ГПУ-мартенсита под нагрузкой и описывается соотношением Клапейрона-Клаузиуса. Температурный интервал образования ГПУ-мартенсита под нагрузкой ΔT_{SIM} и величина $\alpha = d\sigma_{0.1}(T)/dT$ зависят от ориентации кристалла и концентрации никеля в составе ВЭС. Ориентационная зависимость величины $\alpha = d\sigma_{0.1}(T)/dT$, согласно соотношению Клапейрона-Клаузиуса, определяется ориентационной зависимостью теоретической величины деформации превращения ϵ_0 .

Впервые при деформации растяжением в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС обнаружена зависимость коэффициента деформационного упрочнения $\theta = d\sigma/d\epsilon$ и пластичности δ от температуры испытания, ориентации кристалла и концентрации никеля в составе ВЭС. [-144]-кристаллы, ориентированные для одиночного сдвига показывают отличную пластичность при всех исследованных температурах (77 К, M_n , M_d и $T > M_d$). В этих кристаллах, когда деформация развивается МП, двойникованием и скольжением при соответствующей температуре, с увеличением концентрации никеля от 3 до 7 ат. % $\theta = d\sigma/d\epsilon$ уменьшается от 650-700 МПа до 450-500 МПа, а пластичность увеличивается от 35-50 % до 60-75 %, соответственно. Физическая

причина уменьшения $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ и увеличения δ связана с влиянием ближнего порядка на усиление локализации сдвига в одной системе с увеличением концентрации никеля. В [-111] и [001] кристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС при развитии ГЦК-ГПУ МП с самого начала одновременно в нескольких системах $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ находится в пределах от 5000 до 2500 МПа, а пластичность δ от 15 до 30 %, соответственно, при 77К и Мн. С увеличением температуры испытания при $T > M_d$ $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ падает, а пластичность δ растет ($\theta = d\sigma/d\varepsilon < 2000$ МПа, $\delta > 20$ %) и определяется это изменением механизма деформации от ГЦК-ГПУ МП при низких температурах к скольжению и двойникованию при температурах выше температуры M_d . В этих ориентациях $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ и пластичность δ слабо зависят от концентрации никеля.

Впервые показано, что в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС механизм деформации определяет характер разрушения, который не зависит от ориентации кристалла и концентрации никеля в составе ВЭС. Хрупкое разрушение имеет место при развитии ГПУ-мартенсита при температуре 77 К, которая ниже температуры M_k конца прямого ГЦК-ГПУ перехода при охлаждении и при которой образцы содержат 100 % мартенсита. При температуре Мн обнаружен смешанный характер разрушения, содержащий элементы хрупкого и вязкого разрушения. При температуре M_d и $T > M_d$, когда деформация развивается скольжением и двойникованием разрушение становится вязким.

Впервые в монокристаллах [001], [-111] и [-144] $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС при последовательном увеличении деформации в цикле «нагрузка-разгрузка» и в условиях изобарической деформации при $\sigma = \text{const}$ при последовательном увеличении внешних напряжений в цикле «охлаждение-нагрев» в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ ВЭС обнаружен ЭПФ, который зависит от ориентации кристалла и химического состава ВЭС. Максимальный ЭПФ 12 % был получен в [-144] кристаллах при $\sigma_{вн} = 160$ МПа $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ ВЭС. В [001] и [-111] кристаллах ЭПФ имел значение 1.3 и 3.6 %, соответственно, при $\sigma_{вн} = 170$ МПа. В этих кристаллах при уровне внешних напряжений $\sigma_{вн} = 160$ -170 МПа температуры A_n и A_k на 180-270 К выше комнатной температуры. Следовательно, монокристаллы $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ ВЭС проявляют высокотемпературный ЭПФ в условиях изобарической деформации, что для этих сплавов обнаружено впервые.

При изотермической деформации в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС максимальный ЭПФ 14.2 ± 0.2 % и 12.8 ± 0.2 % был реализован в [-144] кристаллах ВЭС, а минимальный $(2.5-3.3) \pm 0.2$ % был обнаружен в [001] кристаллах. При увеличении концентрации никеля ЭПФ в [-111] и [001] кристаллах увеличивался, соответственно, от 5.2 ± 0.2 % и 2.5 ± 0.2 % в $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ ВЭС до 7.4 ± 0.2 % и 3.3 ± 0.2 % в $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС. Это связано с локализацией деформации в одной системе из-за более выраженного ближнего порядка в монокристаллах $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС.

Впервые показано, что циклической стабильностью ЭПФ обладают [-111] кристаллы $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{37}\text{Ni}_3$ и $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{33}\text{Ni}_7$ ВЭС, которые характеризуются более высокими напряжениями $\sigma_{0.1}$ как при 77 К, так и при

температуре M_d , по сравнению с $[-144]$ и $[001]$ кристаллами. В $[-111]$ кристаллах ВЭС стабильным оказался ЭПФ величиной 4 % и 2.5 %, соответственно, при изотермической деформации в циклах «нагрузка-разгрузка (число циклов 20) и при изобарической деформации в циклах «нагрев-охлаждение» при $\sigma_{вн} = 140$ МПа (число циклов 10).

Впервые на $[011]$, $[-144]$ и $[-123]$ кристаллах $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{34.5}Ni_{5.5}$ ВЭС, ориентированных для развития ГПУ сдвига в одной системе, были установлены общие факторы, определяющие большой ЭПФ при развитии ГЦК-ГПУ МП в одной системе. При изобарической деформации максимальный ЭПФ 15.7 % обнаружен в $[-144]$ кристаллах, а наименьший ЭПФ 8.5 % в $[-123]$ кристаллах при внешнем напряжении 150 и 170 МПа, соответственно. В $[011]$ кристаллах ЭПФ достигал 13.8 ± 0.2 % при внешнем напряжении 150 МПа. Основными факторами, определяющими большой ЭПФ при ГЦК-ГПУ МП в этих кристаллах являются: высокий уровень напряжений ГЦК фазы, ближний порядок и индуцированное внешним напряжением σ дополнительное к равновесному состоянию без нагрузки увеличение расщепления d полных дислокаций на частичные дислокации Шокли, которые являются источниками ГПУ-мартенсита.

Впервые показано, что в монокристаллах $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{37}Ni_3$ и $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{33}Ni_7$ ВЭС ГПУ-мартенсит тонкий 5-10 нм. В этих ВЭС ближний порядок затрудняет образование больших пластин ГПУ-мартенсита из-за необходимости разрушения ближнего порядка частичными дислокациями Шокли через одну плоскость $\{111\}$. Впервые в $[-111]$ и $[-144]$ кристаллах $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{37}Ni_3$ ВЭС обнаружено высокотемпературное двойникование при 473 К после 5 % деформации, которое обусловлено сочетанием низкой величины энергии дефекта упаковки и высокого уровня напряжений на пределе текучести за счет повышения температуры Мн. В $[001]$ кристаллах $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{37}Ni_3$ при 473 К после 5 % деформации наблюдаются расщепленные дислокации и дефекты упаковки. В $[-111]$, $[-144]$ и $[001]$ кристаллах $Cr_{20}Mn_{20}Fe_{20}Co_{33}Ni_7$ ВЭС в температурном интервале 373-473 К с начала деформации пластическое течение реализуется скольжением, а двойникование после 5 % деформации не обнаружено.