

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2024 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>30</sub>Ni<sub>10</sub> ВЭС, в которых за счет высокой концентрации никеля 10 ат. % температуры ГЦК-ГПУ МП находятся ниже температуры жидкого азота. Впервые показано, что в монокристаллах Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub> ВЭС температурная зависимость  $\sigma_{0.1}(T)$  имеет вид характерный для сплавов, не испытывающих мартенситный переход. При  $T < 373$  К наблюдается термически-активируемая часть  $\sigma_S(T)$  температурной зависимости  $\sigma_{0.1}(T)$ , на которой напряжения  $\sigma_{0.1}$  увеличиваются с понижением температуры испытания. При  $T > 373$  К наблюдается атермическая часть  $\sigma_G(T)$  температурной зависимости  $\sigma_{0.1}(T)$ , на которой напряжения  $\sigma_{0.1}$  понижаются с увеличением температуры испытания. Температура 77 К оказывается близкой к температуре  $M_d$ , при которой после небольшой деформации в [-111]-, [-144]- кристаллах обнаружен ГПУ мартенсит напряжений. ЭПФ величиной 2.5 % наблюдается только в [-144]-кристаллах в условиях изотермической деформации при 77К при последовательном увеличении деформации до 12 % в цикле «нагрузка-разгрузка».

Впервые показано, что кривые течения, коэффициент деформационного упрочнения и дислокационная структура [001]-, [-111]-, [-144]- монокристаллов Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>30</sub>Ni<sub>10</sub> ВЭС, полученных при 77, 300 и 373К, зависит от ориентации кристалла и температуры испытания. При 77К в [-144]- кристаллах пластическое течение связано с развитием ГПУ мартенсита и двойникования в одну стадию с нулевым  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ , при котором пластичность достигала 90 %. В [-111]- и [001]-кристаллах пластическое течение развивается в одну линейную стадию с упрочнением  $\theta = d\sigma/d\varepsilon > 0$ , и пластичность при этом составляет 35-40 %. В [-111]-кристаллах упрочнение и пластичность определялись одновременным развитием ГПУ мартенсита и двойникования. В [001]-кристаллах при 77К ГПУ мартенсит не был обнаружен, а при 15 % было обнаружено двойникование, которое развивалось по механизму зарождения и роста дефектов упаковки внедрения. При температурах 300 и 373 К в [-111]- и [-144]- кристаллах кривые течения имели вид, характерный для развития деформации двойникованием в ГЦК стабильных ВЭС. В [001] кристаллах деформация развивалась скольжением, а двойникование не наблюдалось.

Впервые получены текстурированные поликристаллы ВЭС Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>35</sub>Ni<sub>5</sub> с текстурой  $\langle 012 \rangle \{111\}$  со средним размером зерна 100-150 мкм, испытывающие ГЦК-ГПУ переход с температурой  $M_s = 296$ К и

олигокристаллы с острой текстурой  $\langle 012 \rangle$ , состоящие из 3-5 зерен со средним размером 800-1200 мкм и ГЦК-ГПУ переходом с температурой  $M_s = 195\text{K}$ . Впервые показано, что ЭПФ и механическое поведение олигокристаллов определяется ориентацией зерна с максимальным размером и по закономерностям развития ГЦК-ГПУ МП и механического поведения олигокристаллы являются близкими с монокристаллами. В олигокристаллах максимальный ЭПФ в условиях изотермической деформации при последовательном увеличении деформации в цикле «нагрузка-разгрузка» и последующем нагреве в свободном состоянии при 573 К в течение 20 минут достигал 6.0-7.5 %, что составляет 42-53 % от теоретического значения.

Впервые показано, что в текстурированных и нетекстурированных поликристаллах ЭПФ имеет близкие значения 0.8-1.2 % и текстура не определяет величину ЭПФ. Выявлены физические факторы ограничивающие ЭПФ в поликристаллах  $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$  ВЭС по сравнению с моно- и олигокристаллами: малый размер зерна, который в 8-10 раз меньше, чем в олигокристаллах, в результате которого при увеличении деформации в цикле «нагрузка-разгрузка» тело зерна быстро заполняется ГПУ мартенситом; границы зерен блокируют обратное движение мартенсита при снятии нагрузки; разная структура в зернах, а именно, в одних зернах наличие нескольких вариантов ГПУ мартенсита, в других только одного варианта мартенсита и в зернах, в которых нет мартенсита.

Впервые на монокристаллах с осью растяжения вдоль направления  $[-144]$   $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{35}\text{Ni}_5$  (ат. %) ВЭС установлено влияние оксидных частиц размером 15–50 мкм и объемной долей 2-4 % на развитие обратимого ГЦК $\leftrightarrow$ ГПУ МП под нагрузкой и ЭПФ при растягивающем напряжении  $\sigma_r = 150$  МПа в цикле «охлаждение-нагрев». Обнаружено, что при  $\sigma_r = 150$  МПа частицы являются источниками зарождения вариантов ГПУ мартенсита с малым фактором Шмида, который затрудняет развитие варианта мартенсита с максимальным фактором Шмида под нагрузкой. Показано, что до температуры  $M_d$  ГЦК $\leftrightarrow$ ГПУ МП развивается последовательно несколькими вариантами ГПУ мартенсита при  $\sigma_r = 150$  МПа в цикле «охлаждение-нагрев» и является полностью обратимым. Максимальная величина  $\varepsilon_{\text{ЭПФ}} = 8$  % реализовывалась, когда развивался вариант ГПУ мартенсита с максимальным фактором Шмида  $m_{\text{ГПУ}} = 0.5$ . При развитии вариантов ГПУ мартенсита с фактором Шмида  $m_{\text{ГПУ}} < 0.5$  величина  $\varepsilon_{\text{ЭПФ}}$  в сумме составила 2.5 % в среднем и суммарная величина ЭПФ достигала 10.5 %.

Впервые на основе экспериментальных данных разработана термодинамическая и микромеханическая модель, описывающая зависимость температур ГЦК-ГПУ МП под нагрузкой и величину ЭПФ от концентрации никеля, ориентации кристаллов, текстуры поликристаллов в новых неэквивалентных  $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{40-x}\text{Ni}_x$  ( $X = 3, 5, 7, 10$ ) ат. % ВЭС.

Монокристаллы и олигокристаллы высокоэнтропийных сплавов  $\text{Cr}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{40-x}\text{Ni}_x$  ( $X = 3, 5, 5.5$ ) ат. % с ЭПФ величиной от 6.5 до 15.5 % могут найти применение в авиации, космосе, строительстве в качестве демпферов механических колебаний, фитингов для соединения труб.