

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2023 году

по проекту «**Высокотемпературная сверхэластичность в высокоэнтропийных высокопрочных монокристаллах (TiHfZr)₅₀Ni₂₅Co₁₀Cu₁₅ и высокопрочных монокристаллах FeMnNiAlX (X = 0, Cr, Ti)**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-19-00017

Руководитель: Чумляков Юрий Иванович, д-р физ.-мат. наук

Впервые методом Бриджмена выращены монокристаллы сплавов с термоупругим ОЦК-ГЦК мартенситным превращением: Fe–33 % Mn–17 % Al–6 % Ni, Fe–33 % Mn–17 % Al–6 % Ni–0.15 % C и Fe–34 % Mn–14 % Al–7.5 % Ni–4 % Cr (ат. %) и приготовлены образцы для сжатия различных ориентаций.

С использованием просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при закалке кристаллов FeMnAlNi, FeMnAlNiC происходит выделение наноразмерных частиц β -фазы размером 4-4.5 нм. Эти частицы определяют развитие сверхэластичности в этих кристаллах в интервале температур от 243 К до 473 К. Старение в высокотемпературной фазе в свободном состоянии и под нагрузкой приводит к росту частиц β -фазы до 6-7.5 нм и сверхэластичность наблюдается от 203 К до 573 К. Отработана новая методика старения под нагрузкой кристаллов частично претерпевших ОЦК-ГЦК мартенситное превращение. На кривых сверхэластичности таких кристаллов наблюдаются две стадии, которые отличаются друг от друга напряжениями для начала превращения σ_{Ms} . Первая стадия с низкими значениями σ_{Ms} , как показали электронно-микроскопические исследования, связана с переходами в областях кристалла, состаренных в мартенсите с малыми размерами частиц. Вторая стадия с высокими значениями σ_{Ms} определяется развитием переходов в областях кристалла с большими размерами частиц, состаренных в высокотемпературной фазе.

Показано, что [001]- и [123]- кристаллы характеризуются близкими значениями механического гистерезиса и величина $\alpha = d\sigma_{Ms}(T)/dT \sim 0.2 \div 0.4$ МПа/К в состоянии после закалки и старения. Низкие значения α являются важной особенностью развития ОЦК-ГЦК мартенситных переходов под нагрузкой, которая делает сплавы этой системы привлекательными для их использования в космосе при освоении Луны и Марса. Изменение температуры в течение суток на Луне происходит в интервале от 400 К до 100 К, на Марсе от 290 К до 100 К и именно в этом интервале температур в сплавах FeMnAlNi наблюдается сверхэластичность. Низкая стоимость компонент сплава, простота термомеханических обработок делает эти сплавы перспективными для использования в медицине и других сферах в виде тонкой проволоки и как массивных деталей демпферов колебаний зданий при землетрясениях и в транспортных системах.

Продолжено исследование термоупругих мартенситных переходов в высокоэнтропийных, высокопрочных кристаллах $(\text{TiZrHf})_{50}\text{Ni}_{25}\text{Co}_{10}\text{Cu}_{15}$ (ат. %) с высокотемпературными эффектами памяти формы и сверхэластичности. Показано, что старение кристаллов в высокотемпературной фазе в свободном состоянии и под нагрузкой не приводит к изменению прочностных свойств высокотемпературной фазы и функциональных свойств (эффекта памяти формы и сверхэластичности) по сравнению с исходными гомогенизированными и закаленными в воду кристаллами. Сопоставление результатов старения кристаллов $(\text{TiZrHf})_{50}\text{Ni}_{25}\text{Co}_{10}\text{Cu}_{15}$ с данными по старению в кристаллах $\text{Ti}_{49}\text{Ni}_{51}$, NiTiHf показывает, что в исследуемых высокоэнтропийных кристаллах отсутствие эффектов старения связано с подавлением диффузии атомов замещения за счет эффекта высокой энтропии в данных сплавах, тогда как в $\text{Ti}_{49}\text{Ni}_{51}$, NiTiHf , которые не являются высокоэнтропийными сплавами, старение с выделением наноразмерных частиц имеет место. Итак, затруднение выделения наноразмерных частиц при старении при 573 К, 2 и 5 часа позволяет создать стабильные микроструктуры вплоть до температур 523-573 К. Сплавы $(\text{TiZrHf})_{50}\text{Ni}_{25}\text{Co}_{10}\text{Cu}_{15}$ (ат. %) представляют значительный практический интерес для их использования как высокопрочных и высокотемпературных сплавов с высокой стабильностью прочностных и функциональных свойств, обусловленной высокой энтропией смешения этих сплавов.