

Сведения о выполненных работах в 2021 году
по проекту «Асимметрия растяжения/сжатия в сплавах Fe-Ni-Co-Al-X
(X = Nb, Ti, Nb-Ti) с эффектом памяти формы – влияние нанокристаллических
частиц на функциональные свойства»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 19-49-04101

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

1. Электронно-микроскопические исследования, проведенные на монокристаллах FeNiCoAlNbTi показали, что старение при 973 К при t от 0.5 часа до 5 часов приводит к выделению частиц γ' -фазы с размером от 3 нм до 10-15 нм, при $t > 5 \div 20$ часов происходит одновременно рост частиц γ' -фазы и выделение частиц β -фазы, размер и объемная доля которой возрастает с увеличением времени старения. Выделение частиц γ' - и β -фаз создают условия для развития ГЦК-ОЦТ термоупругих МП в свободном состоянии и при охлаждении/нагреве под нагрузкой.

2. Впервые в монокристаллах FeNiCoAlNbTi за счет новой методики двухступенчатого старения, когда первая ступень старения 973 К, 5 часов приводит к выделению только γ' -фазы, а на второй ступени при 873К, 2 часа в свободном состоянии или под нагрузкой происходит выделение частиц β -фазы, созданы условия для аномально большого температурного интервала наблюдения СЭ от Mf до 323 К и резиноподобной обратимости при T от 77 К до Mf. Таким образом, температурный интервал обратимой деформации составил 245 К.

3. Исследовано влияние нанокристаллических частиц γ' -фазы на асимметрию функциональных свойств в монокристаллах FeNiCoAlNbTi. Показано, что при размере частиц γ' -фазы $d \sim 3-5$ нм при деформации растяжением вдоль [001]-направления величина СЭ достигает 9.2-9.5 % и превышает деформацию решетки при ГЦК-ОЦТ превращении. С ростом размера частиц величина обратимой деформации уменьшается до 5-2.8 %. Установлено, что превышение обратимой деформации 9.2-9.5 % теоретического ресурса превращения 8.7 % связано с развитием обратимого $\langle 110 \rangle \{110\}$ механического двойникования при $d = 3-5$ нм и его подавлением с ростом $d \geq 5 \div 15$ нм.

Экспериментально показано, что асимметрия при растяжении и сжатии напряжений начала ГЦК-ОЦТ МП определяется соотношением Клапейрона-Клаузиуса

$$d\sigma_{cr}/dT = -\Delta S/\epsilon_0 = -\Delta H/\epsilon_0 T_0, \quad (1)$$

где ΔH , ΔS – соответственно, энтальпия и энтропии превращения, T_0 – температура равновесия фаз, ϵ_0 – деформация превращения. Большим значениям ϵ_0 соответствуют меньшие значения $d\sigma_{cr}/dT$ при деформации растяжением и сжатием при всех исследованных размерах частиц γ' -фазы от 3 нм до 15 нм.

4. Показано, что величина эффекта памяти формы зависит от размера частиц γ' - и β -фаз. При выделении только частиц γ' -фазы в [001] кристаллах FeNiCoAlTiNb величина эффекта памяти формы при растяжении изменяется от 8.7% до 4.5% при вариации размера частиц от 3 до 10-15 нм. Выделение одновременно частиц γ' - и β -фаз при двухступенчатом старении приводит к уменьшению величины эффекта памяти формы до 2.7-4.5% в зависимости от вариации объемной доли частиц β -фазы от 3-5 до 10-15%. Старение под нагрузкой на второй ступени старения приводит к выделению одного варианта частиц β -фазы, появлению внутренних напряжений и к двойному эффекту памяти формы, который не возникает при старении без нагрузки.