

Сведения о выполненных работах в 2019 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 д-р физ.-мат. наук Чумляков Юрий Иванович

Выращены монокристаллы FeNiCoAlX (X = Ti, Nb, TiNb) диаметром 38 мм и длиной до 60 мм, из FeNiCoAlTi изготовлены образцы для исследования эффекта памяти формы и сверхэластичности. Два кристалла FeNiCoAlTi отправлены немецкому партнеру.

Впервые для монокристаллов FeNiCoAlTi разработана двухступенчатая термическая обработка, которая позволяет на $70\div 100$ К повысить температуру Ms по сравнению с непрерывным старением. Первая ступень старения проводится при 873 К, 4 часа в атмосфере инертного газа с закалкой в воду. На второй ступени проводится нагрев до 873 К за 30-40 мин в вакууме, выдержка при этой температуре 1.5 часа или 4 часа с последующим охлаждением за 1.5 часа до комнатной температуры.

Электронно-микроскопически показано, что при одноступенчатом старении при 873 К при t от 4 часов до 20 часов происходит выделение когерентных с высокотемпературной фазой частиц γ' -фазы, размеры которой растут от 4 нм до 14-16 нм, соответственно. При старении на второй ступени происходит выделение частиц β -фазы и в результате образуется структура, содержащая частицы γ' -фазы L12 атомноупорядоченной по типу Ni₃Al с ГЦК решеткой и частиц β -фазы B2 атомноупорядоченной по типу NiAl, которая имеет полукogerентное сопряжение с высокотемпературной γ -фазой.

Впервые показано, что старение под нагрузкой [001]-кристаллов на второй ступени создает условие для двойного эффекта памяти формы с величиной обратимой деформации 3 %. При охлаждении происходит сжатие образца, при нагреве происходит восстановление первоначальной формы за счет растяжения образца.

Экспериментально показано, что напряжения начала γ - α' мартенситных превращений не зависят от способа деформации – растяжения/сжатия. В [001]-кристаллах это связано с тем, что начало мартенситных превращений при сжатии происходит путем образования сдвойникового мартенсита и деформация превращения равна $\varepsilon = 7.8$ %, которая оказывается близкой к деформации превращения при растяжении $\varepsilon_p = 8.3$ %. Величина $\alpha = d\sigma_{кр}/dT$ также оказывается не зависящей от способа деформации – растяжения/сжатия.

Дальнейшее увеличение деформации превращения при растяжении приводит к появлению сверхэластичности и эффекта памяти формы. Показано, что аномально высокие обратимые деформации до 12 % имеют место при растяжении

[001]-кристаллов с наноразмерными частицами диаметром $d < 4$ нм. С ростом размера частиц до 6-12 % величина сверхупругой деформации уменьшается до $8.7 \div 6.7$ %. Значения механического гистерезиса $\Delta\sigma$ варьируются от 700 МПа до 150 МПа при росте частиц от 4 нм до 12 нм. Предполагается, что уменьшение величины $\Delta\sigma$ и $\varepsilon_{пр}$ с ростом размера частиц связано с увеличением тетрагональности мартенсита, и это в свою очередь приводит к уменьшению деформации решетки при γ - α' мартенситных превращениях. В результате достигаются условия, при которых рассеянная энергия ΔG_{diss} оказывается меньше, чем запасенная упругая энергия ΔG_{el} , $\Delta G_{el} \geq 2\Delta G_{diss}$ и впервые создаются условия для наблюдения сверхэластичности при $M_s < T < A_f$.