

Сведения о выполненных работах в 2020 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

Выращены монокристаллы FeNiCoAlNb. Два кристалла посланы немецкому партнеру.

Электронно-микроскопические исследования показали, что при одноступенчатом старении при 973 К размер частиц  $\gamma'$ -фазы, выделение одновременно частиц  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фаз зависят от времени старения. При  $t$  от 15 мин до 5 часов происходит выделение  $\gamma'$ -фазы, размеры которой изменяются от  $d \leq 3-5$  нм до  $d \leq 8-10$  нм. При  $t \geq 7$  часов выделяются одновременно частицы  $\gamma'$ -фаз и  $\beta$ -фазы. Частицы  $\gamma'$ -фазы ГЦК атомноупорядочены по типу L12 с химическим составом (FeNiCo)<sub>3</sub>(NbAl) и когерентно сопряжены с высокотемпературной фазой и мартенситом. При двухступенчатом старении (973 К, 5 ч + 873 К, 2 ч) происходит выделение частиц двух  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фаз.

Впервые показано, что частицы  $\gamma'$ -фазы размером  $d < 3-5$  нм, выделяющиеся на ранних стадиях старения при 973 К  $t$  от 15 мин до 1 часа, создают условия для аномально большой СЭ при растяжении [001]-кристаллов, равной 13 % при кристаллографическом ресурсе деформации 8.7 %. Превышение экспериментально найденной обратимой деформации теоретической оценки на 4.3 % связано с развитием упругого двойникования  $\langle 110 \rangle \{101\}$  в  $\alpha'$ -мартенсите. Предложен механизм аномально большой обратимой деформации, который связан при растяжении с развитием  $\gamma$ - $\alpha'$  МП и последующего  $\langle 110 \rangle \{101\}$  двойникования в  $\alpha'$ -мартенсите, при разгрузке происходит обратимое движение двойников и  $\alpha'$ - $\gamma$  превращения. Увеличение размера частиц  $\gamma'$ -фазы  $d \geq 5$  нм приводит к уменьшению деформации превращения от 8.3 % до 5 %, что связано с увеличением тетрагональности мартенсита  $c/a$ .

При деформации сжатием при размере частиц  $\gamma'$ -фазы  $d \leq 5-8$  нм максимальные значения СЭ равны 12 %, а обратимая деформация при заданной деформации 14.0 % составляет 13.5 % из них СЭ равна 6-6.5 %, а ЭПФ 7 %.

Установлено, что в [001]-кристаллах асимметрия функциональных свойств – СЭ и ЭПФ зависит от размера частиц  $\gamma'$ -фазы  $d$ . При сжатии СЭ и ЭПФ равны, соответственно, 12 и 7 %, а при растяжении – 7 и 6 % при размере частиц  $d < 5-8$  нм.

Впервые предложено новое двухступенчатое старение: 973 К, 5 часов + 873 К, 2 часа, которое повышает температуру  $M_s$  до 190 К и создает условия для появления обратимой деформации (Rubber-like behavior) при  $T < M_f$  и сверхэластичности при

$M_s < T < A_f$ , что приводит к увеличению температурного интервала СЭ. Максимальная величина СЭ при температуре  $M_s$  равна 3.5%, максимальная величина ЭПФ 3.4 % достигается под растягивающими напряжениями 350 МПа. Величина термического гистерезиса под нагрузкой  $\Delta T_T = 75 \text{ K}$  в 3 раза превышает величину термического гистерезиса  $\Delta T_T = 25 \text{ K}$  без нагрузки, что связано с различной структурой мартенсита, образующейся в этих кристаллах: самоаккомодирующей без нагрузки и с формированием варианта мартенсита с максимальным фактором Шмида под нагрузкой.