

Сведения о ходе выполнения проекта  
**«Механизмы фазовых и структурных превращений в высокопрочных  
кристаллах сплавов на основе железа и никелида титана с обычным и  
магнитным эффектом памяти формы»,**  
поддержанного Российским научным фондом

Соглашение № 14-29-00012

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

**2015 год**

1. Впервые на монокристаллах Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%X (X=Ta, Nb) (ат.%), ориентированных для растяжения вдоль [001]-направления в аустените и содержащих наноразмерные частицы  $\gamma'$ -фазы диаметром  $d < 3$  нм, обнаружены anomalно большие обратимые деформации, равные, соответственно, в кристаллах FeNiCoAlNb – 15% и в кристаллах FeNiCoAlTa – 10.2 %, которые превышают деформацию решетки при  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситном превращении, равную 8.7 %. Показано, что эти anomalно большие деформации связаны с развитием в мартенсите механического двойникования по системам  $\langle 110 \rangle \{110\}$ , которое оказывается обратимым в цикле «нагрузка-разгрузка». Наноразмерные частицы  $\gamma'$ -фазы с  $d < 3$  нм имеют когерентное сопряжение с решеткой высокотемпературной фазы (аустенита) и сохраняют когерентность с мартенситом при  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситном превращении. Кристаллы  $\alpha'$ - мартенсита содержат высокую плотность  $\langle 111 \rangle \{211\}$  двойников. С развитием  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситного превращения связана деформация решетки, равная 8.7 %. Затем в  $\alpha'$ -мартенсите происходит механическое двойникование  $\langle 110 \rangle \{110\}$ , которое имеет малые значения вектора Бюргерса и взаимодействует с частицами  $\gamma'$ - фазы по механизму Орована – огибания двойникующими дислокациями дисперсных частиц. Возникающие при взаимодействии двойников с дисперсными частицами обратные дальнедействующие поля напряжений способствуют обратимому движению  $\langle 110 \rangle \{110\}$  двойников в мартенсите одновременно с обратным  $\alpha'$ -  $\gamma$  мартенситным превращением при снятии нагрузки.

Показано, что причина высоких значений термического и механического гистерезисов в кристаллах с частицами с  $d < 3$  нм связана с взаимодействием двойников  $\langle 111 \rangle \{211\}$  и  $\langle 110 \rangle \{110\}$  друг с другом в мартенсите. Подавление  $\langle 110 \rangle \{110\}$  двойникования в мартенсите при росте частиц  $d > 3$  нм приводит к уменьшению термического и механического гистерезисов в 2-5 раз по сравнению с  $d < 3$  нм.

2. На монокристаллах Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%X (X= Nb, NbB) (ат.%) исследовано влияние легирования бором с концентрацией 0.05 ат.% на процессы выделения  $\gamma'$ - и  $\beta$ -фаз, температуры мартенситных превращений, термический и механический гистерезисы. Впервые показано, что бор замедляет процессы выделения  $\gamma'$ -фазы. Бор при одинаковых условиях старения приводит к более низким температурам мартенситных превращений и к подавлению образования частиц  $\beta$ -фазы по сравнению с кристаллами без бора. Значения термического и механического гистерезиса в кристаллах с бором оказываются больше, чем без бора.

Выделение частиц  $\beta$ -фазы в монокристаллах Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%Nb на поздних стадиях старения при 973 К в течение 10 ч размером 80-350 нм и объемной долей до 3-5 % не приводит к охрупчиванию кристаллов и при развитии  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситных превращений наблюдаются эффект памяти формы величиной 4.2 % и сверхэластичность до 6.5 % в интервале температур от 77 К до 293 К.

3. На монокристаллах Fe-28%Ni-17%Co-11.5%Al-2.5%X (X= Ta, Nb, Ta+Ti) (ат.%) при деформации растяжением исследована ориентационная зависимость величины эффекта памяти формы и сверхэластичности, напряжений начала  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситных переходов под нагрузкой. Во всех исследованных кристаллах ориентационная зависимость величины эффекта памяти формы и сверхэластичности оказывается единой. Максимальные значения деформации в кристаллах, содержащих дисперсные частицы размером 5-10 нм, наблюдаются в [001]-ориентации и изменяются от 4.5 % до 8 %. Такая сильная вариация деформации превращения связана с низкой пластичностью кристаллов, которые разрушаются прежде, чем достигнут теоретической величины деформации решетки равной 8.7 % для данной ориентации при  $\gamma$ - $\alpha'$  мартенситном превращении. В [011]- и [123]-кристаллах экспериментальные значения деформации превращения равны, соответственно, 2 % и 2.5 % и так же оказываются меньше теоретических значений деформации решетки 10.5 % и 7.7 %, соответственно. Уменьшение экспериментальных значений деформации превращения по сравнению с теоретическими значениями деформации решетки в кристаллах данных ориентаций связано, во-первых, с их низкой пластичностью и, во-вторых, с деформацией раздвойникованием  $\alpha'$ -мартенсита. При раздвойниковании габитус  $\alpha'$ -мартенсита изменяет свое положение относительно нераздвойникового состояния. Это приводит к увеличению внутренних напряжений, которые не могут релаксировать пластически в результате высокой прочности исходной фазы и кристаллы разрушаются. В [001]-кристаллах, в которых деформация раздвойникованием  $\alpha'$ -мартенсита равна нулю, обратимая деформация в экспериментах по изучению эффекта памяти формы и сверхэластичности оказывается в два и более раз выше, чем в [011]- и [123]-кристаллах. Ориентационная зависимость деформации превращения, в свою очередь, определяет зависимость от ориентации напряжений, необходимых для начала мартенситных переходов под нагрузкой. Величина  $\alpha = d\sigma/dT$  в температурном интервале развития мартенситного превращения под нагрузкой для [001]-, [011]-, [123]-кристаллов равна, соответственно, 2.8 МПа/К, 3.9 МПа/К, 4.7 МПа/К.

4. Установлено отсутствие ориентационной зависимости величины эффекта памяти формы и сверхэластичности, температурного интервала сверхэластичности в состаренных монокристаллах сплавов NiTiHf(Pd), содержащих большую объемную долю ( $f > 30\%$ ) дисперсных частиц H-фазы размером от 50 до 140 нм. Предложены микромеханические модели взаимодействия мартенсита с дисперсными частицами, объясняющие ослабление ориентационной зависимости функциональных свойств за счет подавления дисперсными частицами раздвойникового кристаллов B19'-мартенсита, переход от одновариантного развития мартенситных превращений под нагрузкой к многовариантному с увеличением размера и объемной доли дисперсных частиц размером более 50 нм, не испытывающих мартенситных превращений.

Полученные результаты позволяют развить физические представления о термоупругих мартенситных превращениях в нанокompозитах, в которых параметры микроструктуры – размер не испытывающих мартенситных превращений частиц, и

межчастичные расстояния – имеют масштаб  $50\div 200$  нм и определяют функциональные свойства материалов.

5. Разработана термодинамическая модель зависимости температур мартенситных превращений от ориентации кристалла, уровня внешних приложенных напряжений и получено обобщенное уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Модель учитывает зависимость рассеянной и упругой энергии от температуры испытания и уровня внешних приложенных напряжений.

Предложена микромеханическая модель, которая объясняет вырождение ориентационной зависимости функциональных свойств в гетерофазных монокристаллах. Зависимость деформации превращения от ориентации кристалла, способа нагружения – растяжения/сжатия, размера частиц объясняется с позиций градиентной теории пластичности [M.F. Ashby. The deformation of plastically non-homogeneous materials// Philosophical Magazine. 1970. V. 21. Is. 170. P. 399-424]. Зависимость величины деформации превращения от размера частиц, межчастичного расстояния определяется изменением плотности двойников в кристаллах мартенсита при вариации параметров структуры при полном подавлении процессов раздвойникового мартенсита под нагрузкой. Это является основной причиной ослабления ориентационной зависимости деформации превращения в кристаллах, содержащих когерентные частицы, по сравнению с однофазными кристаллами. При полукogerентном и некогерентном сопряжении решеток высокотемпературной фазы с частицами, частицы являются преимущественными местами зарождения мартенсита и могут генерировать за счет локальных полей напряжений два типа мартенсита. Первый тип это «неориентированный мартенсит», зарождающийся на частицах в системах с малыми значениями внешних напряжений, и второй тип мартенсита – «ориентированный мартенсит», образуется в системах с максимальными значениями фактора Шмида для мартенситного превращения под нагрузкой. Взаимодействие вариантов «ориентированного» и «неориентированного» мартенсита определяет ослабление ориентационной зависимости функциональных свойств, высокие значения термического и механического гистерезиса, увеличение рассеяния энергии с ростом объемной доли мартенсита и высокие значения коэффициента деформационного упрочнения  $\theta$  на кривых «напряжение-деформация»  $\sigma(\epsilon)$  при развитии обратимых мартенситных превращений под нагрузкой.