

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Куц Ольги Анатольевны «Эффект памяти формы и сверхэластичность при термоупругом γ - α' -мартенситном превращении в монокристаллах сплава FeNiCoAlNb», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации. Сплавы с эффектом памяти формы являются перспективными материалами для использования в различных отраслях техники благодаря уникальной способности восстанавливать значительные неупругие деформации при разгрузке (эффект сверхэластичности) или при нагревании (эффект памяти формы). Уникальные свойства этих материалов обусловлены тем, что в них реализуются термоупругие мартенситные превращения, параметры которых определяются химическим составом сплавов. Среди большого класса сплавов с памятью формы можно выделить сплавы на основе железа, например, FeNiCoTi, FeNiCoAlTa, FeNiCoAlNb, в которых эффекты памяти формы и сверхэластичности обусловлены мартенситным превращением из гранцентрированной кубической решетки γ в объемноцентрированную тетрагональную решетку α' . В однофазных сплавах мартенситное превращение является нетермоупругим и для того, чтобы в этих материалах проявлялись эффекты памяти формы и сверхэластичность, необходимо состарить сплав, для того, чтобы в них выделились наноразмерные частицы γ' -фазы диаметром $d \leq 15$ нм, при этом мартенситное превращение становится термоупругим. В поликристаллических сплавах на основе железа FeNiCoAlTa, FeNiCoAlNb при старении происходит два процесса: выделения γ' -фазы в теле зерна и выделение β -фазы по границам зерен. Образование β -фазы в процессе термообработки негативно влияет на свойства сплава, поскольку приводит к хрупкому разрушению образцов. Подавить процесс образования β -фазы можно за счет легирования бором небольшой концентрации 0.05 %, это существенно улучшает прочностные свойства и позволяет обнаружить в этих сплавах уникальные функциональные свойства. Так, в поликристаллах FeNiCoAlTaB при комнатной температуре был обнаружен эффект сверхэластичности, при котором величина обратимой деформации составила 13 %, что оказалось больше теоретического значения величины деформации решетки, которая для этого сплава составляет $\varepsilon_0 = 8.7$ %. Физическая причина появления аномально большой обратимой деформации до сих пор не известна. Кроме того не выявлены

закономерности влияния размера частиц γ' на функциональные свойства сплавов с памятью формы, влияние бора на процессы выделения γ' фазы и свойства сплавов с памятью формы на основе железа. Это препятствует широкому внедрению этих материалов. Для того, чтобы разработать способы управления свойствами сплавов с памятью формы на основе железа необходимо провести систематические исследования по изучению структуры, мартенситных переходов и функциональных свойств в состаренных сплавах содержащих и не содержащих бор. В связи с этим диссертационная работа О.А. Куц, посвященная исследованию влияния старения на процессы формирования частиц γ' фазы и β фазы в присутствии и отсутствии бора, на параметры γ - α' мартенситного превращения, и на эффекты памяти формы и сверхэластичности в монокристаллах сплава Fe-28Ni-17Co-11.5Al-2.5Nb (ат. %), ориентированных вдоль [001]-направления, **является очень важной и актуальной и имеет большое значение, как для теоретических, так и для практических аспектов физики сплавов, претерпевающих фазовые переходы.**

В диссертационной работе О.А. Куц использовала большое количество современных методик - электронную просвечивающую микроскопию, оптическую металлографию, механические испытания на растяжение в широком интервале температур от жидкого азота до 573 К, исследование эффектов памяти формы и сверхэластичности для исследования структуры и свойств монокристаллов сплава Fe-28Ni-17Co-11.5Al-2.5Nb (ат. %), ориентированные вдоль [001] направления. Это позволило ей получить новые уникальные данные и показать, что изменяя длительность старения, размер частиц γ' -фазы, температуру испытания или добавляя в сплав бор можно управлять функциональными свойствами сплава: переделом текучести высокотемпературной фазы, величиной температурного и механического гистерезисов, величиной обратимой деформации и температурным интервалом проявления сверхэластичности. Кроме этого, она установила причину аномально большой обратимой деформации, наблюдаемой в сплаве Fe-28Ni-17Co-11.5Al-2.5Nb, состаренном при температуре 973 К 0,5 часа, и показала, что превышение обратимой деформации теоретического ресурса связано с тем, что при деформировании в сплаве реализуется γ - α' прямое мартенситное превращение, а затем кристаллы α' мартенсита испытывают упругое двойникование, что и дает дополнительный вклад в величину обратимой деформации.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы. В диссертации получены новые результаты, наиболее значимыми из которых можно выделить следующие:

Показано, что выделения наноразмерных частиц γ' -фазы размером 3 – 16 нм и объемной долей до 15 – 20 % при старении монокристаллов нового сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Nb (ат.%), приводит к тому, что в сплаве реализуется термоупругое γ - α' -мартенситного превращения. Старение монокристаллов сплава FeNiCoAlNb при температуре 973 К в течение 10 часов приводит к тому, что вместе с γ' -фазой в сплаве выделяются частицы β -фазы, однако их появление не приводит к охрупчиванию кристаллов и позволяет обнаружить сверхэластичность величиной 5.0–6.5 % в температурном интервале от 77 К до 293 К.

Впервые обнаружено, что в [001]-монокристаллах сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Nb, состаренных при температуре 973 К 0,5 часа и содержащем частиц γ' -фазы ($d \leq 3$ нм) при проявлении эффекта сверхэластичности при температуре 77 К величина обратимой деформации оказывается аномально большой 15.3 % и в 2 раза превышает теоретический ресурс ($\varepsilon_0 = 8.7$ %) для кристаллов данной ориентации. Установлена причина аномально большой обратимой деформации, и показано, что это обусловлено тем, что в процессе деформирования накопление деформации происходит по двум механизмам: сначала сплав деформируется за счет γ - α' -мартенситного превращения под нагрузкой, а затем упругого двойникования по плоскостям $\{110\}$ в кристаллах α' -мартенсита.

Установлено, что легирование бором монокристаллов сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Nb (ат.%) уменьшает скорость роста кристаллов γ' -фазы при старении, что приводит к понижению температур γ - α' -мартенситного превращения, подавлению образование β -фазы и увеличению температурного ΔT^o и механического $\Delta \sigma$ гистерезисов.

Показано, что температурная зависимость фазового предела текучести в [001]-монокристаллах сплава Fe–28Ni–17Co–11.5Al–2.5Nb (ат.%) состаренных при температуре 973 К менее 10 часов подчиняется соотношению типа Клапейрона-Клаузиуса, а величина $d\sigma_{0.1}/dT$ составляет 2.8 МПа/К и не зависит от времени старения или наличия атомов бора в сплаве.

Достоверность научных результатов и выводов работы подтверждается использованием современных методов исследования; большим объемом выполненных экспериментов, данные которых коррелируют друг с другом; корректной обработкой результатов экспериментов; полнотой анализа полученных данных с применением

теоретических оценок на основе последних достижений физики термоупругих мартенситных превращений; соответствием сформулированных выводов целям и задачам исследования, а также сопоставлением результатами работы с данными, полученными другими авторами.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования результатов исследования при разработке и создании высокопрочных сплавов с памятью формы на основе железа с заданными функциональными свойствами, которые могут быть применены в широком интервале температур для решения различных задач в технике. Результаты работы могут быть использованы при разработке теоретических моделей, описывающих поведение сплавов с памятью формы, содержащих наноразмерные частицы вторичных фаз.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации. Экспериментальный материал, представленный в диссертации, получен с использованием современного оборудования. Основные результаты диссертации не противоречат экспериментальным данным, известным в литературы. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Основные результаты диссертации О.А. Куц опубликованы в 24 работах, в том числе 8 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и в библиографическую базу Web of Science, и были широко апробированы на Всероссийских и Международных конференциях. Основные положения и выводы диссертации научно обоснованы и соответствуют целям и задачам исследования.

По диссертации необходимо сделать следующие замечания:

1. На рисунке 3.3. видно, и это отмечено в тексте, что зависимости $\sigma_{0,1}(T)$ в интервале 77К – M_d смещаются параллельно сами себе в направлении больших температур с увеличением длительность отжига от 0,5 ч до 7 часов. Непонятно почему автор считает, что температуры M_s и M_d смещаются по-разному, и меняется температурный интервал M_s - M_d (стр.76 и таблица 3.2).

2. В разделе 3.1 показано, что закаленный сплав не испытывает мартенситного перехода. Однако в разделе 3.2.(стр. 97) и последующих разделах сказано, что результаты работы показали, что старение меняет кинетику мартенситного перехода с нетермоупругого в закаленном сплаве к термоупругому в состаренных сплавах. Если закаленный сплав не испытывает мартенситного перехода, то на каком основании сделано заключение о его нетермоупругом характере?

3. Согласно данным, представленным на рисунках 3.5 и 3.6, старение повышает температуры прямого перехода и понижает температуры обратного перехода. К сожалению, в работе не обсуждаются возможные причины того, почему выделение частиц по-разному влияет на температуры прямого и обратного переходов.

4. В тексте диссертации встречаются предложения с неясным смыслом, например:

Стр. 79 «И это связано с тем, что частицы β фазы являются более крупными, чем частицы γ' -фазы, в результате начало пластического течения начинается вначале вблизи частиц β фазы, а затем в объеме матрицы и это приводит к падению напряжений при старении в течение 10 часов при 973 К»

Стр. 95 «Во-вторых, γ - α' -МП под нагрузкой в экспериментах по изучению ЭПФ под нагрузкой...»

Стр. 122 «Наложение понижения температуры M_s на сильную температурную зависимость $\sigma_{0,1}(T)$ в кристаллах с бором приводит к кажущемуся росту напряжений при $T=M_d$ в этих кристаллах по сравнению с кристаллами без бора»

5. В тексте встречаются опечатки:

Заключение, пункт 2, надо указать не от 0.5 до 10 часов, а от 0.5 до 7 часов, поскольку после старения 10 часов коэффициент $d\sigma/dT$ равен 1.8, а не 2.8 (см. Таблицу 3.2.)

Заключение, пункт 7 написано, что бор повышает температуры фазовых переходов, а должно быть написано «понижает».

Сделанные замечания не ставят под сомнения результаты и выводы работы или положения, выносимых на защиту, и не снижают научную и практическую значимость исследований, а также общей высокой положительной оценки работы. Диссертация хорошо структурирована, написана грамотно и изложена доступным для широкого круга специалистов научным языком. Содержание диссертационной работы, состоящей из введения, четырех глав и заключения отвечает цели и задачам научного исследования. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

Основываясь на проведенном анализе представленных материалов, считаю, что диссертационная работа Куц О.А., является законченным

научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне и, вносит существенный вклад в развитие физики термоупругих мартенситных превращений и физики функциональных высокопрочных кристаллов сплавов на основе железа. По объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям п. II. 9-11 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а Куц Ольга Анатольевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07– Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры общей математики и информатики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный университет»

Адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. д.7-9,

Тел: +7 (812) 328-20-00,

spbu@spbu.ru, <http://www.spbu.ru>

E-mail: resnat@mail.ru (n.resnina@spbu.ru)

доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.07- физика
конденсированного состояния)

Наталья Николаевна Реснина

Личную подпись заверяю

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА КАДРОВ №3

Н. И. МАШТЕПА



07.12.2016

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей