

ОТЗЫВ

официального оппонента Беляева Сергея Павловича на диссертационную работу Куксгаузен Ирины Владимировны «Термоупругие мартенситные превращения и функциональные свойства в монокристаллах ферромагнитного сплава Co–Ni–Ga с наноразмерными частицами γ' -фазы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Разработка и изучение материалов с термоупругими мартенситными превращениями, способных к возврату больших неупругих деформаций, является важным направлением исследований в физике твердого тела. В настоящее время к таким материалам предъявляются повышенные требования, обусловленные необходимостью их функционирования в условиях больших напряжений и температур, а также возможностью инициирования эффекта памяти формы изменением магнитного поля. Одними из перспективных материалов, удовлетворяющих подобным требованиям, являются ферромагнитные сплавы Гейслера состава, близкого к Co_2NiGa . Поликристаллические сплавы Co–Ni–Ga при механическом нагружении разрушаются хрупко вследствие высокой упругой анизотропии. По этой причине работоспособными являются монокристаллические сплавы, однако, их свойства в полной мере не исследованы. В силу сказанного тема диссертационной работы И.В.Куксгаузен, посвященной изучению термоупругих превращений и функциональных свойств монокристаллов ферромагнитного сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ в однофазном и состаренном состояниях, является достаточно актуальной.

Куксгаузен И.В., используя монокристаллы сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ и современные методики исследования – механические испытания на сжатие в широком температурном интервале от температуры жидкого азота до 573K, электронную просвечивающую микроскопию, дифференциальную сканирующую калориметрию – в своей работе экспериментально показала, что путем вариации ориентации оси кристалла, температуры испытания и условий старения (в свободном от напряжений состоянии и под сжимающей нагрузкой 150МПа при температуре 623K), можно управлять не только структурой мартенсита, но и величиной температурного и механического гистерезисов, величиной деформации превращения, температурным интервалом проявления сверхэластичности. Кроме того, возможно получить высокотемпературную сверхэластичность при температуре выше 373K и большой по величине двойной эффект памяти формы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней получен ряд новых и важных результатов, среди которых необходимо выделить следующие. На

однофазных монокристаллах ферромагнитного сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ экспериментально обнаружена ориентационная зависимость величины обратимой деформации при изучении эффекта памяти формы (ЭПФ) и сверхэластичности (СЭ), критических напряжений образования мартенсита под нагрузкой, температурного и механического гистерезисов. Показано, что ориентационная и температурная зависимости критических напряжений $\sigma_{0.1}$, определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. В однофазных монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ при B2-L1₀ мартенситном превращении обнаружен широкий температурный интервал сверхэластичности, величина которого зависит от ориентации кристалла и достигает 290 К для [001]-кристаллов. Установлено, что выделение наноразмерных частиц γ' -фазы в монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$ приводит к уменьшению величины эффекта памяти формы, сверхэластичности и величины $\alpha = d\sigma_{0.1}/dT$. Одновременно с этим проявляется высокотемпературная сверхэластичность при $T=573\text{K}$ во всех ориентациях, увеличивается температурный интервал СЭ и ослабляются ориентационные зависимости величины обратимой деформации, критических напряжений, необходимых для начала превращения под нагрузкой, величины температурного и механического гистерезисов.

Предложена термодинамическая модель, объясняющая появление стадий на зависимости $\sigma_{0.1}(T)$ в температурном интервале $M_s < T < M_d$ в монокристаллах с частицами γ' -фазы, которая учитывает изменение величины обратимой деформации и рассеянной энергии при МП с ростом температуры испытания и напряжений.

В монокристаллах сплава $\text{Co}_{49}\text{Ni}_{21}\text{Ga}_{30}$, ориентированных вдоль $[\bar{1}23]$, [011]- и [001]- направления, после старения при 623К, 15мин под сжимающей нагрузкой, и в $[\bar{1}23]$ -, [011]- и [001]-однофазных монокристаллах после предварительных тренировок в температурном интервале проявления СЭ обнаружен двойной ЭПФ. Установлено, что величина и знак двойного ЭПФ зависят от условий создания внутренних полей напряжений и ориентации кристалла.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена корректным использованием современных методов исследования, непротиворечивостью экспериментальных данных и их корректной обработкой с применением теоретических оценок на основе последних достижений физики термоупругих мартенситных превращений, а также сопоставлением с результатами, полученными другими исследователями.

О полноте и достоверности результатов проведенного исследования свидетельствуют 23 публикации в печатных изданиях, в том числе 9 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и в библиографическую базу Web of Science. Основные результаты диссертации И.В. Куксгаузен апробированы на всероссийских и международных научных конференциях.

Диссертация хорошо оформлена, качество исполнения представленного в ней графического материала высокое. Работа в необходимом и достаточном количестве проиллюстрирована рисунками и фотографиями, полученными методами просвечивающей высокоразрешающей электронной микроскопии.

Автореферат диссертации отражает основные результаты и выводы диссертационной работы.

По диссертационной работе И.В. Куксгаузен необходимо сделать следующие замечания:

1. В диссертации установлено, что при старении под нагрузкой кристаллов с ориентировкой $[\bar{1}23]$ растёт один вариант наноразмерных частиц γ' -фазы, а в кристаллах с ориентировкой $[001]$ – четыре варианта. Объяснения этому факту, к сожалению, отсутствуют.

2. В работе механический гистерезис определяли на середине петли сверхэластичности, как разницу напряжений между прямым и обратным мартенситными превращениями под нагрузкой. Однако, заметим, что в соответствии с классическими исследованиями, посвященными термодинамике термоупругих мартенситных превращений, гистерезис следует определять как разность температур $A_f - M_s$, поскольку условия появления первого кристалла мартенсита при охлаждении соответствуют условиям исчезновения последнего кристалла мартенсита при нагревании. Следуя этой логике следовало бы определять механический гистерезис по разнице напряжений в момент появления первого кристалла мартенсита при нагружении и исчезновения последнего кристалла мартенсита при разгрузке. Тем более что, судя по представленным в работе данным, деформационное упрочнение на зависимостях «напряжение-деформация» может быть существенно нелинейным.

3. В диссертации очень часто используется термин «приложенное внешнее напряжение». Это явно избыточная характеристика напряжения. «Внешнее» не может быть «не приложенным», а «приложенное» не может быть «не внешним». Заметим, что, строго говоря, напряжение в некоторой точке кристалла или в малой его области вообще не может быть внешним или внутренним.

4. К сожалению, в тексте диссертации встречаются опечатки и несогласованные предложения, что затрудняет понимание содержания диссертации. В качестве примера укажем на предложение со страницы 187: «Двойной ЭПФ в этих кристаллах наблюдать не удастся из-за того, что нулевые напряжения для реализации двойного ЭПФ лежат ниже температуры жидкого азота.»

Отмеченные замечания не затрагивают основных выводов работы и выносимых на защиту положений и не снижают научной и практической значимости исследований, а также общей высокой положительной оценки работы.

Диссертационная работа Куксгаузен И.В. является законченным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, и вносит вклад в развитие физики

термоупругих мартенситных превращений и физики функциональных высокопрочных монокристаллических материалов. Считаю, что по объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает требованиям ВАК (п. 9-14 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Куксгаузен Ирина Владимировна является высококвалифицированным научным работником и несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния), ведущий научный сотрудник кафедры Теории упругости Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»



Беляев Сергей Павлович

18.11.2015

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

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Тел: +7 (812) 328-20-00,

E-mail: spbu@spbu.ru

Подпись руки С. Г. Бешмеева
 заверено: [подпись] н - на управлении
 и суров



Горина Н.А.