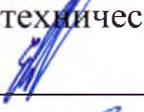


УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
физики прочности и материаловедения

Сибирского отделения Российской
академии наук,

доктор технических наук

 Е. А. Колубаев

« 26 »  2019 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук на диссертацию Ларченковой Натальи Геннадьевны «Закономерности проявления и циклическая стабильность функциональных свойств гетерофазных монокристаллов сплава NiFeGaCo с памятью формы», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Ларченковой Натальи Геннадьевны посвящена экспериментальному исследованию циклической стабильности эффекта сверхэластичности, двустороннего эффекта памяти формы, выявлению и анализу закономерностей проявления термоупругих мартенситных превращений в монокристаллах ферромагнитного сплава Ni₄₉Fe₁₈Ga₂₇Co₆ (ат. %) при вариации кристаллографической ориентации и термической обработки.

Актуальность темы. Разработка функциональных сплавов с термоупругими мартенситными превращениями, проявляющих гарантированные многократные обратимые деформации при воздействии температуры, внешнего напряжения и магнитного поля с целью их применения в качестве рабочего тела различных силовых приводов, сенсоров и демпфирующих устройств является одной из важных задач современного материаловедения. Исследования сплавов в монокристаллическом состоянии позволяют исключить влияние межзёренных границ и связанных с ними эффектов (хрупкость ферромагнитных поликристаллов, обусловленную высокой анизотропией констант упругости), а также изучить влияние кристаллографической ориентации и тонкой структуры мартенситной фазы на устойчивость исследуемого материала к циклическим нагрузкам. По этой причине представляют интерес исследования монокристаллов ферромагнитных сплавов NiFeGaCo, как перспективных материалов с большими обратимыми деформациями при проявлении эффекта памяти формы и сверхэластичности ($\epsilon = 6,2\%$ при сжатии и $\epsilon = 12,5\%$ при растяжении), широким

температурным интервалом проявления сверхэластичности, а также с большими магнитоиндуцированными деформациями до $\varepsilon = 8,5 \%$.

Одной из слабо разработанных проблем ферромагнитных сплавов с памятью формы остается циклическая стабильность их функциональных свойств. Для повышения надежности и работоспособности готовых изделий из этих интеллектуальных материалов необходимы знания о механизмах деградации функциональных свойств и физически обоснованных способах повышения их стабильности. В связи с вышесказанным тема диссертационной работы Н. Г. Ларченковой является актуальной.

Общая характеристика структуры и содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Библиографический список включает 136 наименований. Общий объем диссертации содержит 185 страниц, из них 164 страницы текста, включая 85 рисунков и 16 таблиц.

Во **введении** отражена актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен обзор по теории термоупругих мартенситных превращений, введены основные понятия термодинамики мартенситных превращений, рассмотрены механизмы и особенности проявления сверхэластичности, одностороннего и двустороннего эффектов памяти формы. Подробно описаны кристаллографические особенности мартенситных превращений в сплавах NiFeGa(Co) и приведен анализ литературы, посвященный исследованиям циклической стабильности функциональных свойств сплавов с эффектом памяти формы.

Во **второй главе** автор формулирует и обосновывает цель и задачи исследования, описывает используемые методики исследования. Подробно обосновывает методы и режимы получения гетерофазных монокристаллов сплава NiFeGaCo с бимодальным распределением частиц выделяющихся фаз по размерам и возможности их ориентированного роста при старении под нагрузкой. Для выяснения вклада раздвойникового кристаллов $L1_0$ -мартенсита под действием внешних напряжений на проявление и циклическую стабильность функциональных свойств в работе для исследования выбраны две кристаллографические ориентации: вдоль [123]-направления, в котором процесс раздвойникового кристаллообразования возможен и вдоль [001]-направления, в котором раздвойниковообразование $L1_0$ -мартенсита затруднено по геометрическим условиям приложения внешнего напряжения.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния ориентации и микроструктуры монокристаллов $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ (структуры высокотемпературной и низкотемпературной фаз, размера и объемной доли выделяющихся частиц γ - и γ' - фаз и количества вариантов дисперсных частиц γ' - фазы) на особенности проявления функциональных свойств (эффект памяти формы, сверхэластичность) и закономерности их циклической деградации. Благодаря проведению термических и термомеханических обработок, целенаправленному выбору ориентации автору удалось получить: высокопрочные состояния в данных монокристаллах, проявляющие высокотемпературную сверхэластичность при сжатии в широком температурном интервале ($\Delta T=270$ К), и создать условия для реализации высокой циклической стабильности эффекта сверхэластичности (до 50 000 циклов без разрушения).

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты по изучению различных способов наведения двустороннего эффекта памяти формы и оценки их эффективности в гетерофазных монокристаллах сплава NiFeGaCo с различной микроструктурой. Автором выяснены условия наблюдения двустороннего эффекта памяти формы с обратимой деформацией близкой к теоретической возможной величине деформации кристаллической решётки при мартенситном превращении и закономерности деградации данного эффекта при термоциклировании. В разделе обсуждаются деградационные механизмы в случае обратимой и необратимой деградации двустороннего эффекта памяти формы.

В заключении сформированы выводы диссертационной работы. Диссертация написана на современном научном уровне, хорошо оформлена, содержит большое количество экспериментальных данных.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации. Обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечена комплексным использованием современных методов и методик исследования, повторяемостью выявленных закономерностей и всесторонним анализом полученных данных, соответствием экспериментальных данных результатам других авторов. Основные результаты диссертационной работы Ларченковой Н. Г. сформулированы ясно, обоснованность и достоверность вынесенных на защиту положений и сделанных выводов не вызывает сомнений.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Новизна полученных результатов определяется систематическим исследованием циклической стабильности сверхэластичности и двустороннего эффекта памяти формы, выяснением микроструктурных механизмов деградации функциональных свойств после циклических испытаний. Из наиболее значимых научных результатов работы можно отметить следующие:

1. Экспериментально показано, что высокотемпературная сверхэластичность при сжатии монокристаллов сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$, ориентированных вдоль [001]-направления, не имеет зависимости от структурного состояния образцов (однофазного или гетерофазного) при испытаниях от комнатной температуры до $\sim 573\text{K}$. Особенности проявления высокотемпературной сверхэластичности обусловлены упругим тетрагональным искажением решетки аустенита при приложении внешнего напряжения до начала превращения и разницей модулей упругости аустенитной и мартенситной фаз в данном температурном диапазоне.

2. Установлены закономерности влияния γ -частиц размером до 30 мкм в гетерофазных монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ на деградацию эффекта сверхэластичности: с увеличением числа циклов деформирования под воздействием внешнего напряжения на образцы и последующей их разгрузки накапливаются дислокации на межфазной границе « γ -фаза – матрица». Качественно показано, что накопление остаточного мартенсита и дислокаций в аустенитной фазе вблизи частиц γ -фазы и пластической деформации этих частиц вплоть до их фрагментации является причиной деградации эффекта сверхэластичности.

Теоретическая значимость полученных автором результатов. Установленные закономерности проявления функциональных свойств и их циклической стабильности при охлаждении/нагреве и под нагрузкой в монокристаллах $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ при изменении ориентации и режима термической обработки могут быть использованы для развития теории термоупругих МП в ферромагнитных гетерофазных монокристаллах сплавах Гейслера.

Практическая значимость полученных автором результатов. Практическая значимость полученных результатов заключается в создании материала, способного испытывать многократные обратимые деформации с высокой циклической стабильностью параметров при использовании максимального ресурса деформации кристаллической решетки. Результаты диссертации представляют большой интерес для специалистов, работающих в области физики конденсированного состояния и физического материаловедения, и их можно рекомендовать к использованию в организациях, ведущих исследования по разработке новых функциональных материалов: Институт физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук (г. Уфа), Томский государственный архитектурно-строительный университет, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург), НИ технологический университет МИСиС (г. Москва), Санкт-Петербургский государственный университет, Томский государственный университет.

Отражение результатов диссертационной работы в публикациях и автореферате. По теме диссертации Н. Г. Ларченковой опубликовано 23 работы: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и входящих в международные базы данных – Scopus или Wos, 2 статьи, входящих в базу данных Web of Science, 16 публикаций в сборниках материалов конференций всероссийского и международного уровня и 1 патент.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертации.

Соответствие содержания диссертации указанной специальности. По объектам, целям, методам проведенных исследований и содержанию диссертация соответствует специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (физико-математические науки) в области исследования «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств сплавов в твердом состоянии в зависимости от химического состава, температуры и давления» (п. 1 паспорта специальности).

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертационной работе большое внимание уделяется влиянию микро- и наноразмерных частиц γ - и γ' -фазы на закономерности проявления функциональных свойств и их циклическую стабильность в монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$. В таблице 3.3 на стр. 81 для монокристаллов после термических обработок приведены значения объемной доли данных частиц, которые были определены по результатам исследований оптической и электронной микроскопии. Однако снимков, по которым проводился расчет объемной доли частиц и подробного описания методики расчета не представлено.

2. Автором работы получен важный экспериментальный результат: в состаренных монокристаллах сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ увеличение скорости деформации от 4×10^{-3} до $8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ в циклах нагрузка/разгрузка не оказывает существенного влияния на характеристики сверхэластичности в отличие от сплавов на основе никелида титана. Однако физическая причина такой стабильности сверхэластичности в исследуемых материалах не обсуждается.

3. При анализе механизмов деградации сверхэластичности, основанном на электронно-микроскопических исследованиях, в работе используют только качественные оценки увеличения объемной доли остаточного мартенсита и плотности дислокаций с увеличением числа циклов, тогда как количественные оценки существенно повысили бы ценность данных результатов.

4. В работе (как в автореферате, так и в диссертации) имеются неточности и опечатки. Например, на странице 157 в таблице 4.4 наблюдается недописанное, либо неверно сокращенное слово; на страницах 65 и 67 в двух предложениях нарушено согласование слов и т.д.

Данные замечания не влияют на высокую оценку работы Н. Г. Ларченковой.

Заключение. Диссертационная работа «Закономерности проявления и циклическая стабильность функциональных свойств гетерофазных монокристаллов сплава NiFeGaCo с памятью формы» соответствует всем требованиям п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. №1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель Ларченкова Наталья Геннадьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа, автореферат диссертации и отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН. Протокол № 50 от «21» ноября 2019 г.

Отзыв составил

Советник директора по научно-организационным вопросам,

главный научный сотрудник,

заведующий лабораторией материаловедения сплавов с памятью формы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского Отделения Российской академии наук,

доктор физико-математических наук

(01.04.07 – физика конденсированного состояния),

профессор

Александр Иванович Лотков

«22» ноября 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Тел: +7 (3822) 49-18-81;

E-mail: root@ispms.tomsk.ru;

Сайт: <http://www.ispms.ru>