

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Ларченковой Натальи Геннадьевны «Закономерности проявления и циклическая стабильность функциональных свойств гетерофазных монокристаллов сплава NiFeGaCo с памятью формы», 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 очень перспективны для применения в различных отраслях промышленности и медицины благодаря своим уникальным способностям восстанавливать большие неупругие деформации при нагревании или разгрузке и генерировать реактивные напряжения. Эти материалы успешно применяют в качестве датчиков, приводов однократного и многократного действия, преобразователей энергии, соединительных элементов и др. Наиболее широко применимым материалом среди сплавов с памятью формы является никелид титана, однако его высокая стоимость, плохая обрабатываемость и низкая циклическая стабильность сдерживает расширение области применения этих сплавов. Поэтому значительные усилия ученых направлены на получения новых сплавов с памятью формы, которые по функциональным свойствам будут сопоставимыми с никелидом титана, при этом будут лишены его недостатков. К таким материалам относятся сплавы на основе NiFeGa, которые, например, проявляют эффект псевдоупругости, величина которого даже выше, чем в никелиде титана. Для того чтобы определить области применения сплавов на основе Ni-Fe-Ga, необходимо провести всесторонние исследования свойств этих материалов. Если к настоящему времени эффекты памяти формы и псевдоупругость достаточно хорошо исследованы, то циклическая стабильность свойств этих сплавов, как в режиме псевдоупругости, так и в режиме термоциклирования, изучены не достаточно. Однако именно эти свойства оказываются крайне важными для применения сплавов на основе Ni-Fe-Ga в устройствах многократного действия. В связи с этим тема диссертационной работы Ларченковой Н.Г., посвященная исследованию циклической стабильности функциональных свойств монокристаллов сплава Ni-Fe-Ga-Co, который является представителем семейства сплавов на основе Ni-Fe-Ga, **является очень важной и актуальной и имеет большое значение, как для теоретических, так и для практических аспектов физики сплавов, претерпевающих фазовые переходы.**

Основным достоинством работы можно считать то, что все исследования выполнены на монокристаллах с различной структурой, что позволило установить влияние структуры сплава, наличия частиц вторичных фаз, их параметров (размера, ориентированности), типа мартенситного перехода на циклическую стабильность функциональных свойств сплава. Кроме этого, исследования проведены для двух различных ориентировок монокристалла, в которых принципиально различаются процессы формирования ориентированного мартенсита. В монокристаллах [001] раздвойникование при сжатии не происходит, а в монокристаллах [-123] - происходит, что позволило установить влияние раздвойникования на параметры эффектов памяти формы и стабильность свойств.

В диссертационной работе Ларченкова Н.Г. использовала современные и хорошо апробированные методики исследования структуры, мартенситных переходов и функциональных свойств, что в совокупности с большим объемом выполненных экспериментов, данные которых коррелируют друг с другом, корректной обработкой результатов экспериментов, полнотой анализа полученных данных с применением теоретических оценок на основе термодинамики термоупругих мартенситных превращений, соответствием сформулированных выводов целям и задачам исследования, а также сопоставлением результатов работы с данными, полученными другими авторами, позволило обеспечить **достоверность** полученных в работе данных и установить новые закономерности проявления функциональных свойств в сплаве $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$.

Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы. В диссертации получены новые результаты, наиболее важными из которых являются следующие.

Показано, что величина и температуры изменения деформации при охлаждении и нагревании сплава $\text{Ni}_{49}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_6$ под напряжением зависят от структуры монокристаллов. Установлено, что минимальное напряжение, при котором в цикле охлаждение – нагревание наблюдается максимальная обратимая деформация, составляет 20 – 30 МПа в сплавах с $L2_1$ структурой аустенитной фазы. Если в аустенитном состоянии монокристалл находится в $B2$ фазе, то это напряжение возрастает до 60 МПа. Сделано заключение о том, что такое поведение связано с типом мартенситного перехода, который имеет место в монокристаллах.

Установлено, что температурный интервал проявления псевдоупругости является весьма широким вне зависимости от структуры монокристаллов, однако механический гистерезис максимален в образцах в $B2$ структурой. Кроме этого показано, что смещение температур

мартенситных переходов под нагрузкой в монокристаллах с $L2_1$ структурой подчиняется соотношению типа Клаузиуса – Клапейрона, тогда как в монокристаллах с $B2$ структурой зависимость температур перехода от напряжения нелинейна. Обнаружено, что предварительная деформация за счет инициирования эффекта псевдоупругости, стабилизирует мартенсит в монокристаллах с $L2_1$ структурой, что понижает напряжения, необходимы для инициирования мартенситного перехода в последующих циклах. В монокристаллах с $B2$ структурой, напротив, стабилизируется аустенит, поэтому напряжения повышаются.

Показано, что монокристаллы с $[001]$ ориентацией демонстрируют лучшую механоциклическую стабильность, чем $[-123]$ монокристаллы. Это связано с тем, что в монокристаллах $[-123]$ образование $L1_0$ мартенсита приводит к пластической деформации, что расширяет гистерезис превращения и ухудшает циклическую стабильность сплава. Показано, что если при деформации монокристаллов с ориентацией $[-123]$ избежать появления $L1_0$ фазы, то циклические свойства монокристаллов улучшаются. Установлены закономерности изменения параметров эффекта псевдоупругости при многоцикловых испытаниях. Обнаружены три зоны деградации эффекта псевдоупругости и установлены механизмы, отвечающие за изменение параметров этого эффекта на каждом из этапов. На основе полученных в диссертации данных установлены факторы, отвечающие за циклическую стабильность эффекта псевдоупругости в монокристаллах сплава $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$.

Исследовано влияние способа тренировки монокристаллов с различной структурой на эффект обратимой памяти формы (двухсторонний эффект памяти формы). Определены оптимальные условия тренировок, которые позволили получить недостижимые ранее результаты. Так, например, в монокристаллах, состаренных под сжимающей нагрузкой, величина эффекта обратимой памяти формы составила 4% после предварительной изобарической тренировки и 5,5 % после изотермической тренировки. Показано, что увеличение числа тренировочных циклов немонотонно влияет на величину эффекта обратимой памяти формы и для каждой структуры существует оптимальное число циклов, которое обеспечивает реализацию максимальной обратимой деформации. Установлено, что снижение обратимой деформации при большем количестве тренировочных циклов связано с развитием пластической деформации. Показано, что вне зависимости от структуры сплава величина эффекта обратимой памяти формы уменьшается при термоциклировании, что связано с деградацией этого эффекта из-за уменьшения внутренних ориентированных напряжений.

В установившемся режиме величина эффекта обратимой памяти формы больше в монокристаллах, состаренных под сжимающим напряжением. Показано, что дополнительная тренировка частично восстанавливает величину обратимой деформации.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования результатов исследования при разработке и создании сплавов с памятью формы на основе Ni-Fe-Ga-Co с заданными функциональными свойствами, которые могут быть применены в устройствах многократного действия для решения различных задач в технике. Результаты работы могут быть использованы при разработке и апробации теоретических моделей, описывающих поведение сплавов с памятью формы при циклических испытаниях.

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 литературе. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Основные результаты диссертации Н.Г. Ларченковой опубликованы в 23 работах, в том числе в 6 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК и в библиографические базы Web of Science и Scopus, 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. В работе многократно отмечается, что в монокристаллах, состаренных под напряжением, для достижения максимальных величин обратимой деформации необходимо приложить меньшие внешние напряжения, чем в монокристаллах, состаренных без напряжения. Вместе с тем, при старении под напряжением в структуре возникают ориентированные частицы вторичной фазы, которые создают внутренние ориентированные напряжения, поэтому эффективные напряжения, действующие, например, при охлаждении, будут больше, чем внешние напряжения. В связи с этим возникает вопрос о величине внутренних ориентированных напряжений и о том, как величина эффективных напряжений (внутренних и внешних) будет коррелировать с величиной внешних напряжений, позволяющих достигать

тот же уровень обратимых деформаций в монокристаллах, состаренных без нагрузки.

2. При термодинамическом анализе, представленном в работе, не указано, как вычисляли скачок энтропии при мартенситном переходе, необходимый для расчета температур мартенситных переходов. Как менялась эта величина в зависимости от структуры монокристаллов и типа мартенситного перехода?

3. Если уменьшение величины псевдоупругой деформации при увеличении температуры деформирования связано с упругой деформацией аустенита, то почему при температуре свыше 450 К, увеличение температуры не приводит к уменьшению псевдоупругой деформации, ведь упругая деформация аустенитной фазы продолжает увеличиваться, т.к. напряжения, необходимые для наведения мартенситной фазы, возрастают.

4. В работе указано, что одной из возможных причин деградации эффекта обратимой памяти формы (двухстороннего эффекта памяти формы) является увеличение объемной доли остаточного мартенсита при термоциклировании в ненапряженном состоянии. Возникает вопрос, почему при температуре выше A_f остается мартенсит и почему в экспериментах не проводили нагревание до большей температуры для того, чтобы полностью перевести сплав в аустенитное состояние?

5. Хотелось бы пожелать автору в дальнейшем уделять большее внимание оформлению работы. Так, в тексте присутствуют опечатки, есть ссылки на несуществующие номера рисунков, присутствуют нелепые выражения, например, «кривые зависимости...». В автореферате нет расшифровки некоторых символов, которые используются в тексте.

Сделанные замечания не ставят под сомнение результаты и выводы работы или положения, выносимые на защиту, и не снижают научную и практическую значимость исследований, а также общую высокую положительную оценку 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 Ларченковой Н.Г. «Закономерности проявления и циклическая стабильность функциональных свойств гетерофазных монокристаллов сплава NiFeGaCo с памятью формы» соответствует критериям, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, действующего пп. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Ларченкова Наталья Геннадьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент
профессор кафедры общей математики и информатики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»
199034 г. Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7-9,
тел. +7(812) 328-20-00,
spbu@spbu.ru, <http://www.spbu.ru>
доктор физико-математических наук

Реснина

Наталья Николаевна Реснина

На обработку персональных данных согласна
дата

ДАННУЮ ПОДПИСАЛА
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА
П. И. МАВТЕПА

