

*На правах рукописи*

Чикова Тамара Семеновна

**Физика и механика деформационного  
двойникования металлов**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2004 год

Работа выполнена на кафедре вычислительных методов механики деформируемого тела Санкт-Петербургского государственного университета

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
Заслуженный деятель науки РФ, профессор  
К. Ф. ЧЕРНЫХ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В. И. БЕТЕХТИН

доктор физико-математических наук, профессор Р. А. ВАСИН

доктор физико-математических наук, профессор М. А. НАРБУТ

Ведущая организация: Институт машиноведения РАН

Защита состоится 20 октября 2004 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного Совета Д.212.229.08 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: Политехническая ул., д. 29, к. 2, ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке СПбГТУ

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, доцент

Т. В. Воробьева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Развитие науки и техники ставит перед исследователями-металлофизиками задачи создания материалов с принципиально новыми физическими свойствами и разработки надежной теории, способной объяснить их механическое поведение при разных режимах деформирования. Реальная пластичность и прочность кристаллов определяется рядом микроскопических процессов: генерированием, движением и взаимодействием дислокаций, зарождением и перемещением точечных дефектов, развитием микротрещин и т.д. Чтобы целенаправленно воздействовать на механические свойства кристаллических тел, необходимо выделить микропроцессы, определяющие пластические и прочностные характеристики материала в заданных условиях.

На основе широких экспериментальных исследований разработаны дислокационные представления физических процессов, протекающих при скольжении, чистом двойниковании и разрушении. Теория дислокаций стала эффективным аппаратом исследования и моделирования эволюции структуры на атомарном уровне. Установлено, что пластическая деформация монокристаллов может протекать двумя основными способами: скольжением, которое осуществляется движением полных дислокаций в плоскости скольжения, и двойникованием, реализуемым перемещением частичных дислокаций. Пластическая деформация двойникующихся металлов, где эти два вида деформации, как правило, протекают одновременно, – до сих пор явление малоизученное и не поддающееся прогнозированию.

Исследования фундаментальных закономерностей деформационного двойникования в реальных кристаллах и его влияния на механические и

физические характеристики металлов имеют большое научное и прикладное значение. Увеличивается ассортимент новых технически важных материалов с низкосимметричными кристаллическими решетками и гетерофазными структурами. В таких материалах чаще основным видом пластической деформации является не скольжение, а двойникование. Диапазоны рабочих параметров современной техники расширяются в области низких температур и динамических нагрузок, в результате чего двойникование становится неотъемлемым видом деформации обычных конструкционных материалов. Возможно использование механических двойников в качестве элементов устойчивой внутренней структуры, обеспечивающей высокопрочное состояние двойникующихся материалов, что является одним из резервов целенаправленного изменения механических свойств металлов. Границы раздела фаз и двойников могут служить узлами накопления и переработки информации. Механическое двойникование играет важную роль в проявлении эффектов памяти формы, которые в настоящее время интенсивно изучаются, их применение открывает большие перспективы во многих отраслях техники. Управление процессами зарождения и развития двойников, особенно на клиновидной стадии, позволит значительно расширить возможности использования необычных свойств сплавов, обладающих памятью формы. Практическое освоение технологически перспективных сплавов на основе двойникующихся металлов сдерживается из-за невозможности управления пластической деформацией двойникованием.

До настоящего времени не сформированы физические представления о закономерностях деформационного двойникования в условиях развитого скольжения, отсутствуют сведения о микропроцессах, обеспечивающих реализацию пластической деформации двойникованием в металлических кристаллах, что делает невозможным не только практическое ис-

пользование, но даже прогнозирование его зарождения и развития. Сложившаяся ситуация в изучении двойникования объясняется, прежде всего, многофакторностью явления, большими скоростями его протекания и отсутствием надежных методик изучения. Выяснение микромеханизмов эволюции дефектной структуры металлов в процессах пластической деформации является актуальной проблемой физики конденсированного состояния.

К началу выполнения диссертационного исследования были установлены количественные характеристики двойниковых прослоек в случае чистого двойникования и подробно изучено двойникование в кальците. Предложены модели двойникующих дислокаций и дислокационных источников, экспериментально доказана дислокационная структура двойниковых границ.

Выявлена стадийность процесса пластической деформации двойникованием в отсутствие скольжения. Установлена универсальность упругого двойникования в материалах с различными кристаллическими структурами и типами связей. Сделан вывод о том, что механическое двойникование является фундаментальным свойством кристаллических систем, обусловленным анизотропией упругих свойств решетки. Создана дислокационная теория упругого двойникования. Выявлена аналогия механических свойств единичной двойниковой прослойки и кристаллического макротела.

Изучены кристаллографические элементы и условия проявления двойникования во многих минералах, металлах, сплавах и химических соединениях. Сформировано понимание сложных температурных зависимостей процессов двойниковой перестройки кристаллической решетки. Исследовано влияние различных факторов на двойникование: дефектности кристаллов, примесей и легирования, типа твердого раствора, режима

деформирования и др. Наиболее интенсивно исследование двойникования развивалось в направлениях изучения влияния двойникования на физические свойства кристаллической решетки (термодинамические, магнитные, электрические, оптические, акустические) и выяснения его роли в процессах пластической деформации, разрушения и фазовых превращений.

Несмотря на несомненный прогресс в понимании физики чистого двойникования, в области изучения деформационного двойникования металлов накопилось много нерешенных проблем. К ним можно отнести отсутствие устойчивых количественных характеристик механического двойникования металлических кристаллов, общепринятых экспериментальных методов его исследования, данных о закономерностях зарождения деформационных двойников в металлах под действием концентрированной нагрузки. Литературные сведения о кинетике двойникования в металлах носят разрозненный характер и не поддаются системному анализу; невоспроизводимость экспериментальных данных приводит к тому, что результаты различных авторов несопоставимы между собой, а иногда и противоречат друг другу. Развитие остаточных деформационных двойников в металлах не укладывается в схему стадийности чистого двойникования; не сформированы физические представления о закономерностях пластической деформации двойникованием, протекающей в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения. Полученные результаты о механическом поведении единичных двойниковых прослоек в металлах при различных режимах нагружения не нашли объяснения с единой точки зрения.

#### **Цель работы и основные задачи исследования.**

Научная и практическая важность изучения деформационного двойникования металлов, а также комплекс нерешенных проблем определили цель и задачи данного исследования.

Целью работы является комплексное экспериментальное изучение закономерностей зарождения и развития остаточных деформационных двойников в металлах с ромбоэдрической и гексагональной решетками; формирование физических представлений о двойниковой перестройке кристаллической структуры при наличии скольжения; обоснование, построение и реализация феноменологического описания механических свойств единичных двойниковых прослоек в металлах.

Из-за невозможности непосредственного наблюдения за процессами двойникования в непрозрачном металлическом образце выводы о микропроцессах, протекающих в кристалле под нагрузкой, можно делать только на основании косвенных данных об изменении механических характеристик материала на мезо- и макроуровнях. Наиболее адекватной методологией научного исследования в данном случае является моделирование двойниковой перестройки на основании анализа наиболее общих экспериментальных закономерностей зарождения и развития деформационного двойника в металле, включающего создание физической модели, описание процессов с помощью математических уравнений, проведение расчетов и проверку адекватности физической и математической моделей с помощью натуральных экспериментов.

Для реализации программы исследования решались следующие задачи:

- разработка экспериментальных методик, позволяющих получать воспроизводимую количественную информацию об эволюции остаточных деформационных двойников в металлах под нагрузкой;
- накопление, обработка и физический анализ статистических экспериментальных данных об изменении размеров и форм единичных клиновидных двойников и их ансамблей при увеличении действующих механических напряжений в металлических монокристаллах с

- гексагональной и ромбоэдрической решетками при статическом, импульсном и термомеханическом воздействиях;
- экспериментальное изучение механических свойств единичных двойниковых прослоек при непрерывном, знакопеременном и пульсирующем нагружениях;
  - анализ сдвиговых процессов на двойниковых границах с ростом нагрузки, выявление микромеханизмов пластичности металлических кристаллов на стадии остаточного двойникования и количественное изучение их силовых, температурных и временных зависимостей;
  - разработка физической модели роста остаточного клиновидного двойника в реальном кристалле, математическое моделирование движения ансамбля двойникующих дислокаций через сетку случайных препятствий;
  - моделирование и количественное феноменологическое описание механического поведения единичной двойниковой прослойки в металлическом кристалле при различных режимах нагружения;
  - дислокационная трактовка параметров феноменологического описания остаточного деформационного двойникования металлов.

**Научная концепция.** Разработка основ физики и механики процессов пластической деформации двойникованием в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения на базе экспериментальных исследований эволюции дефектной мезоструктуры металлов с разной кристаллографической структурой при различных режимах нагружения в широком диапазоне изменения силовых, температурных и временных параметров деформирования.

**Научная новизна.** Все полученные в диссертации результаты являются новыми. Впервые разработана методика исследования деформационного двойникования металлических кристаллов и проведено последова-



тельное систематическое экспериментальное изучение зарождения и развития остаточного деформационного двойникования в металлах с гексагональной и ромбоэдрическими решетками на клиновидной стадии и стадии сквозной двойниковой прослойки при различных режимах нагружения. Обнаружены новые явления на некогерентных двойниковых границах и установлены физические закономерности пластической деформации двойникованием при наличии скольжения, обусловленные коллективным поведением двойнивающих дислокаций, образующих деформационный двойник, а также вероятностной природой перераспределения деформации в ансамбле механических двойников у концентраторов напряжений. Выявлены элементарные дислокационные механизмы структурной перестройки в условиях взаимодействия деформационного двойника с дефектами структуры. Разработана статистическая модель роста клиновидного двойника в реальном кристалле. Развита единый макроскопический подход к количественному описанию механического поведения единичных двойниковых прослоек в металлах, установлен дислокационный смысл феноменологических параметров.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Закономерности зарождения остаточных клиновидных двойников в металлах под действием сосредоточенной нагрузки при статическом, импульсном и термомеханическом воздействиях. Явление образования двойниковой текстуры в монокристаллах висмута, сурьмы и цинка в результате гетерогенного зарождения двойниковых прослоек при термоциклировании.
- Закономерности эволюции размеров и формы остаточной клиновидной двойниковой прослойки в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения с ростом внешней сосредоточенной нагрузки. Неравномерное, непропорциональное, неоднозначное изменение

размеров двойникового клина, отсутствие корреляции между процессами генерирования и перемещения двойникующих дислокаций на границах раздела. Перераспределение деформации на границах двойников в ансамбле, проявления обратимой пластичности на стадии остаточного двойникования.

- Стадийность в развитии остаточного клиновидного двойника. Микромеханизмы формирования остаточных двойниковых прослоек в металлах, их силовые и температурно-временные зависимости.
- Вероятностная математическая модель роста клиновидного двойника в реальном кристалле, построенная на основании экспериментально обоснованной физической концепции об определяющей роли взаимодействия двойникующих дислокаций со стопорами двух типов. Экспериментальная проверка модели.
- Метод моделирования и количественного описания механических свойств единичных двойниковых прослоек в металлах при различных режимах нагружения. Феноменологическое описание релаксационных явлений и упрочнения на двойниковых границах. Экспериментальное определение феноменологических параметров макроскопического описания.
- Дислокационные трактовки феноменологических параметров описания остаточного двойникования в металле, устанавливающие связь макро- и микрохарактеристик ансамбля двойникующих дислокаций, образующих двойниковую прослойку, их экспериментальные оценки.

**Практическая ценность работы.** Научная значимость результатов исследования определяется тем, что они формируют физические представления о механизмах деформационного двойникования в условиях развитого скольжения, дают единый макроскопический подход к описанию

механического поведения единичных двойниковых прослоек при различных режимах нагружения и могут служить основой при создании общей теории прочности и пластичности двойникующихся кристаллов.

Практическая значимость заключается в возможности целенаправленного воздействия на интенсивность протекания микропроцессов двойникования, что позволяет наметить пути практического решения проблемы упрочнения и пластификации двойникующихся металлов. Обнаруженный эффект пластификации за счет образования двойниковой текстуры в поверхностных слоях монокристаллов при термоциклировании может стать эффективным элементом при разработке методов повышения пластичности двойникующихся материалов. Обратимая пластичность на границах раздела остаточных двойниковых прослоек свидетельствует о том, что двойникование является эффективным и пока не освоенными в практическом плане механизмом релаксации внутренних напряжений.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в физическом материаловедении при создании новых высокотехнологичных материалов с заданными механическими и физическими свойствами, в физике прочности и пластичности при разработке методов упрочнения и пластификации металлов и сплавов, в физике конденсированного состояния для создания фундаментальной физической теории пластической деформации реальных кристаллов. Отдельные результаты работы могут быть использованы в спецкурсах по физике прочности и пластичности при подготовке специалистов в высших учебных заведениях. Разработанные экспериментальные методики, подходы к моделированию и описанию деформационного двойникования могут быть полезны при изучении родственных физических явлений, таких как бездиффузионные (мартенситные) фазовые превращения и разрушение.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VI и VII Республиканских конференциях молодых ученых по физике (Минск, 1980, 1982 г.), V Республиканской конференции математиков Белоруссии (Гродно, 1980 г.), II и III Всесоюзных школах по физике пластичности и прочности (Харьков, 1981, 1984 г.), IV Международной школе-симпозиуме «Физика и химия твердого тела» (Благовещенск, 1994 г.), VIII Белорусской математической конференции (Минск, 2000 г.), XXXVI Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2000 г.), XXXVII Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» (Киев, 2001 г.), XXXVIII Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» (С.-Петербург, 2001 г.), XIII Петербургских чтений по проблемам прочности (С.-Петербург, 2002 г.), Всероссийской конференции «Дефекты структуры и прочность кристаллов» (Черноголовка, 2002 г.), XIV Петербургских чтений по проблемам прочности (С.-Петербург, 2003 г.), III Международной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений (MPFP)» (Тамбов, 2003 г.), Международной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2003 г.), Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск, 2003 г.), XLII Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» (Калуга 2004 г.).

Наиболее важные этапы исследования обсуждались на научных семинарах отдела фазовых превращений института металлофизики НАН Украины (Киев), лаборатории пластичности ФТИНТ НАН Украины (Харьков), кафедры физики твердого тела БГУ (Минск), в координационном совете по физике прочности и пластичности и новым методам обработки материалов ФТИ НАН Беларуси (Минск), на заседании металлургической секции ученого совета ФТИ НАН Беларуси (Минск), на научном

семинаре института машиноведения РАН (С-Петербург, руководитель академик Н. Ф. Морозов): на кафедре вычислительных методов механики деформируемого тела СПбГУ (С-Петербург, руководитель профессор Ю. М. Даль); на кафедре теоретической и прикладной механики СПбГУ (С-Петербург, руководитель профессор П. Е. Товстик).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликована 51 работа, в том числе две монографии и препринт. Основные публикации приведены в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 221 наименования. Работа изложена на 281 странице, включает 102 рисунка и 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено современное состояние экспериментальных и теоретических исследований пластической деформации двойникованием, дан краткий обзор работ по изучению деформационного двойникования металлов, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы научная концепция, цель и основные задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, указаны данные об апробации работы.

**Первая глава** посвящена методам получения и исследования двойниковых прослоек в металлах. В ней проанализированы методические особенности экспериментального изучения пластического деформирования металлов двойникованием. Выбор монокристаллов цинка, бериллия, кадмия, висмута, сурьмы и сплавов на их основе для проведения исследований аргументирован тем, что эти металлы имеют различные кристалли-

ческие решетки и обладают разными пластическими свойствами; среди них есть материалы, принадлежащие к той же кристаллической сингонии, что и ионные кристаллы, на которых изучались закономерности чистого двойникового; при комнатной температуре в них одновременно реализуются оба вида пластической деформации – скольжение и двойникование; изготовление монокристалльных образцов этих металлов не связано со сложной обработкой, приводящей к искажению структуры, и они обладают совершенной рабочей поверхностью, обеспечивающей высокое качество наблюдений рельефа и точность измерений с помощью металлографического микроскопа. Изложены способы деформирования образцов для получения ансамблей остаточных клиновидных двойников и единичных двойниковых прослоек. Предложен метод повторного индентирования образца с промежуточными разгрузками, позволяющий исследовать эволюцию формы и размеров остаточных двойникованных областей с ростом нагрузки и изучать последовательные стадии развития двойникового в металле. Обоснована необходимость проведения статистических исследований при изучении закономерностей развития двойников на клиновидной стадии. Обсуждены основные количественные характеристики деформационных двойниковых прослоек в металлах.

**Во второй главе** изучено зарождение клиновидных остаточных двойников в металлах при деформировании монокристалльных образцов методом микроиндентирования. Сосредоточенной нагрузкой в металле невозможно получить одну двойниковую прослойку с заданной ориентацией. В радиально спадающем поле упругих напряжений, создаваемых алмазной пирамидкой, всегда возникает серия клиновидных двойников в пересекающихся плоскостях двойникового. Исследование нескольких тысяч отпечатков, выполненных алмазной пирамидкой на разных металлах и при различных условиях нагружения, показало, что количество ос-

таточных клиновидных двойников, возникающих в каждом акте индентирования при идентичных условиях, различно, однако существуют некоторые устойчивые закономерности в их расположении относительно граней и ребер индентора. Особенности индентора задают постоянный набор концентраторов напряжений, обеспечивающих зарождение двойников практически при каждом вдавливании индентора в поверхность образца. Количество стабильных концентраторов напряжений зависит от глубины погружения индентора в кристалл, то есть от величины действующей нагрузки.

Появление остальных двойников непредсказуемо и определяется тремя основными факторами: случайными дефектами структуры, скоплениями полных дислокаций на линиях скольжения и скоплениями двойникующих дислокаций на некогерентных двойниковых границах. Эти концентраторы обеспечивают уровень локальных перенапряжений в кристалле, необходимый для гетерогенного зарождения двойникования. Количество таких концентраторов определяется объемной плотностью гетерогенностей в кристаллической решетке и зависит от размеров пластически деформированной зоны, определяемой величиной внешней нагрузки, и интенсивностью предшествующего и сопутствующего скольжения. Двойниковые прослойки, возникающие на скоплениях полных дислокаций, всегда локализованы за пределами отпечатка индентора и имеют линзовидную форму. Их зарождение обусловлено скольжением и при температуре жидкого азота, когда интенсивность сопутствующего скольжения заметно снижается, двойники этого типа практически не возникают. Ветвление двойниковой структуры зависит от напряженного состояния кристалла в области границ раздела. Двойники-ветви зарождаются на скоплениях двойникующих дислокаций в наиболее искривленных местах границы двойникового клина, где концентрация внутренних напряжений

от сосредоточенной нагрузки максимальна, и обеспечивают релаксацию этих напряжений, предотвращая разрушение кристалла.

Изучена роль внутренних напряжений в возбуждении очагов двойникования в свежевывалотых образцах и в кристаллах, подвергнутых длительному отжигу. Снижение интенсивности зарождения двойников в результате длительного отжига объясняется релаксацией пиков локальных перенапряжений и уменьшением числа зародышевых центров в результате устранения микро- и макронапряжений при переходе кристалла в термодинамически более стабильное состояние. В отожженных образцах во всем диапазоне нагрузок заметно снижается число линзовидных двойников, в то время как частота появления двойниковых ветвей остается практически неизменной. Увеличение степени дефектности кристаллов путем контролируемого введения дислокаций леса, напротив, активизирует интенсивность двойникования преимущественно за счет гетерогенного зарождения двойников на случайных концентраторах напряжений у отпечатка пирамидки и на границах двойниковых прослоек.

Зарождение очагов двойникования и генерирование двойникоующих дислокаций источниками зависят от времени выдержки кристалла под нагрузкой. Эти зависимости подобны кривым логарифмической ползучести, что качественно подтверждает контролируемую роль флуктуационных составляющих в процессах двойниковой перестройки под действием сосредоточенной нагрузки, и служат доказательством кинетической природы элементарных дислокационных процессов, обеспечивающих деформационное двойникование.

Температурные зависимости интенсивности зарождения двойников носят сложный характер и контролируются скольжением, которое выполняет противоположные функции: приводит к увеличению количества дефектов в кристалле, служащих центрами зародышеобразования, и тем



самым стимулирует двойникование и обеспечивает релаксацию локальных напряжений, необходимых для начала двойникования, и подавляет его.

Обнаружен эффект зарождения тонких линзовидных двойников при термоциклировании ненагруженных монокристалльных образцов исследуемых металлов в интервале температур ( $77 \Leftrightarrow 373$ ). Появление двойников группами свидетельствует об автокаталитическом развитии структуры, как и в случае зарождения мартенситных игл, то есть возникновение первых двойников приводит к созданию локальных напряжений, которые стимулируют зарождение и развитие новых очагов двойникования. К 350-400 циклам зарождение новых двойников затухает и на плоскости спайности кристалла образуется двойниковая текстура, которая охватывает более 80% поверхности. Изучение структуры в объеме термоциклированных образцов показывает, что двойники возникают только в поверхностном слое, толщина которого не превышает длины отдельных двойников, при этом с появлением сетки двойников микротвердость снижается почти в два раза, что объясняется пластифицирующим действием двойникования.

Во всех экспериментах по термоциклированию образцов висмута, сурьмы и цинка и их последующему деформированию возрастающей сосредоточенной нагрузкой не выявлено образование трещин по двойниковым границам или при пересечении двойниковых прослоек. Явление пластификации за счет образования двойниковой текстуры в поверхностных слоях монокристаллов при термоциклировании оказалось общим для металлов с гексагональной и ромбоэдрической структурами. Эти результаты имеют практическое значение: термоциклическая обработка может стать эффективным элементом при разработке методов повышения пластичности двойникующихся материалов.

Проанализированы дислокационные характеристики остаточных двойников, возникающих у концентраторов напряжений различных типов. На основании статистических исследований установлено, что остаточный клиновидный двойник в металле образован ансамблем, состоящим из  $N_{\text{дв}} \sim 10^3 - 10^4$  двойникообразующих дислокаций, локализованных в небольшой области кристалла. Величина параметра  $\frac{h}{L}$  ( $L$  – длина клиновидного двойника,  $h$  – толщина у устья) для клиновидных двойников во всех исследованных металлах составляет  $\sim 10^{-2} \div 10^{-1}$ , что на два порядка отличает ее значения  $\frac{h}{L} \approx 10^{-4} \div 10^{-3}$  для упругого двойникования. Порядок величины параметра  $\frac{h}{L}$  – устойчивая количественная характеристика остаточных клиновидных двойников в металлах, он не зависит от вида кристаллической решетки металла, величины нагрузки или типа концентратора напряжений, у которого возник деформационный двойник.

**В третьей главе** изложены результаты комплексного экспериментального исследования эволюции остаточных клиновидных двойниковых прослоек под нагрузкой в условиях развитого предшествующего и сопутствующего скольжения при различных режимах и условиях деформирования. Изучение размеров и формы остаточных клиновидных двойников в металлических монокристаллах при ступенчатом увеличении нагрузки проводилось двумя взаимодополняющими методами: однократным воздействием нагруженной алмазной пирамидкой и повторным индентированием с промежуточными разгрузками.

Размеры клиновидных двойников, одновременно зарождающихся под действием индентора, заметно отличаются между собой. Зависимости средних размеров остаточных клиновидных двойников в металлах от нагрузок  $\bar{L}(P)$  и  $\bar{h}(P)$ , в отличие от аналогичных зависимостей на стадии роста упругого двойника, нелинейны, из чего следует отсутствие пропорциональной связи между нагрузкой и размерами двойниковой прослойки.

Дополнительную информацию об особенностях роста клиновидных двойников, которую невозможно получить в металлах прямыми наблюдениями, дает статистическая обработка экспериментальных данных. Оказалось, что статистические распределения двойников по длинам  $\frac{\Delta N}{N}(L)$

имеют сложную полимодальную форму (нефлуктуационный характер выявленных максимумов проверялся несколькими известными способами). Периодичность максимумов на экспериментальных графиках статистических распределений  $\frac{\Delta N}{N}(L)$  свидетельствует о неравномерном скачкообразном движении ансамбля двойникующих дислокаций, связанном с периодическими задержками на препятствиях, которые встречает вершина двойника при распространении в глубь кристалла. Статистические распределения двойников по длинам очень чувствительны к структурному состоянию образца, условиям и режиму деформирования кристалла. Микроструктурные изменения на границах раздела двойников

отражаются на форме кривых  $\frac{\Delta N}{N}(L)$ , и это дает возможность на основании анализа макроскопических характеристик делать выводы об элементарных процессах деформации.

скачкообразном движении ансамбля двойникующих дислокаций, связанном с периодическими задержками на препятствиях, которые встречает вершина двойника при распространении в глубь кристалла. Статистические распределения двойников по длинам очень чувствительны к структурному состоянию образца, условиям и режиму деформирования кристалла. Микроструктурные изменения на границах раздела двойников

отражаются на форме кривых  $\frac{\Delta N}{N}(L)$ , и это дает возможность на основании анализа макроскопических характеристик делать выводы об элементарных процессах деформации.

скачкообразном движении ансамбля двойникующих дислокаций, связанном с периодическими задержками на препятствиях, которые встречает вершина двойника при распространении в глубь кристалла. Статистические распределения двойников по длинам очень чувствительны к структурному состоянию образца, условиям и режиму деформирования кристалла. Микроструктурные изменения на границах раздела двойников

При повышении температуры полимодальность на графиках  $\frac{\Delta N}{N}(L)$  исчезает.

Сглаживание статистической кривой вызвано двумя причинами, обусловленными интенсификацией сопутствующего скольжения с ростом температуры: увеличением числа стопоров в окрестностях сдвойникованных областей и релаксацией напряжений в вершине клина, в результате чего многие препятствия становятся для двойника непреодолимыми. Результаты изучения влияния степени дефектности кристаллов на характер статистических распределений двойников по длинам также свидетельствуют в пользу стопорного механизма перемещения клиновидного двойника в кристалле.

Еще больше подробностей в развитии деформационных двойников обнаруживается в ходе наблюдений за каждой прослойкой в отдельности при повторном индентировании в ту же лунку с повышением нагрузки. Рост клина происходит не только непропорционально и неравномерно, но его длина и толщина изменяются неоднозначно: двойник может как увеличиваться под нагрузкой, так и уменьшаться; и несинхронно: размеры  $L$  и  $h$  могут одновременно изменяться противоположным образом. Выявлено десять возможных схем развития клиновидных двойников при увеличении сосредоточенной нагрузки и изучены условия и механизмы их реализации.

Развитие остаточного клиновидного двойника, обусловленное увеличением размеров, осуществляется микропроцессами генерирования и перемещения двойникующих дислокаций. Тангенциальное движение дислокаций в плоскости двойникования в направлении двойникования реализует пробег двойникующих дислокаций и приводит к росту его длины.

Утолщение двойниковой прослойки происходит путем нормального перемещения двойниковой границы в направлении, перпендикулярном плоскости двойникового в результате непрерывного генерирования новых двойнивающих дислокаций в каждой соседней с границей раздела кристаллографической плоскости матрицы.

Исчезновение и уменьшение клиновидных двойниковых прослоек означает их полный или частичный выход из кристалла. Обратимая пластичность при двойниковании известна для упругой стадии развития или при действии на сдвойникованный кристалл внешних напряжений обратного знака. Обнаруженная обратимость пластической деформации на стадии остаточного двойникования при увеличении знакопостоянных внешних механических напряжений – новое явление. Для выяснения физической природы различных проявлений обратимой пластичности на границах остаточных клиновидных двойников проведено количественное изучение влияния величины нагрузки на развитие двойников с разными вариантами изменения размеров. Перераспределение деформации на границах двойника в ансамбле определяется характером напряженного состояния в окрестностях его границ. Механические напряжения, создаваемые внешней нагрузкой, двойниками и дефектами структуры, суммируясь, создают в объеме материала сложное поле механических напряжений. В зоне деформации образуются локальные нескомпенсированные поля упругих напряжений, величину и знак которых в любой точке вокруг отпечатка невозможно определить однозначно. Эти напряжения в зависимости от знака могут стимулировать двойникование, либо вызывать обратный процесс – раздвойникование. Коллективный механизм движения двойнивающих дислокаций, который является определяющим на стадии роста или уменьшения упругого двойника, в процессе развития остаточной прослойки в металле нарушается. Ансамбль двойнивающих дислокаций раз-

бивается на отдельные фрагменты, которые могут перемещаться независимо друг от друга, иногда – в противоположных направлениях.

Другой важный аспект в выяснении физических закономерностей формирования дислокационной структуры двойниковых границ состоит в изучении формы клиновидных двойников. Выделено несколько типов двойников, отличающихся геометрическими особенностями строения границ. Как показали исследования, появление двойника того или иного типа возможно при любой нагрузке и любом режиме деформирования. Искривления границ раздела могут происходить в результате их взаимодействия с дефектами структуры. При этом форма прослойки изменяется по-разному в зависимости от места расположения и мощности стопора. Предсказать формы двойников, возникающих у отпечатка в условиях неоднородного напряженного состояния нельзя, однако, по внешнему виду двойника можно смоделировать дислокационное строение границ и проанализировать механизмы их формирования. При гомогенном генерировании двойникующих дислокаций точечными источниками клиновидные двойники имеют прямолинейные или криволинейные границы, образованные дислокациями одного знака; дислокации другого знака выходят из кристалла, создавая на поверхности характерную ступеньку. При гетерогенном размножении двойникующих дислокаций линейными источниками границы двойников состоят из дислокаций обоих знаков и имеют профиль сечения линзы. Рост застопоренных двойников может прекращаться на любой стадии.

Во всех сериях проведенных в работе экспериментов можно уверенно проследить три стадии развития остаточных клиновидных двойников. На первой стадии появляется тонкий двойниковый клин с параметром, характеризующим некогерентность границ  $\frac{h}{L} \sim 10^{-3}$ , границы двойника

образованы двойниющими дислокациями одного знака. На второй стадии происходит сжатие дислокационного ансамбля и разрушение поля ориентированных напряжений. Форма двойника изменяется от клиновидной с прямолинейными границами до клина с криволинейными границами. У большинства двойников наблюдается асимметрия в развитии вторичных пластических сдвигов на готовых поверхностях раздела, активной часто остается лишь одна из границ, вторая – сохраняет прямолинейность.

Параметр  $\frac{h}{L}$  увеличивается до значений  $\sim 10^{-2} \div 10^{-1}$ . Главная особен-

ность двойниования на этой стадии – включение новых микромеханизмов развития сдвойниованного объема: гетерогенного зарождения петель двойниующих дислокаций на готовых границах раздела, расширения петель двойниующих дислокаций, аннигиляции двойниующих дислокаций различных знаков. На границах раздела появляются новые геометрические элементы – между устьем и вершиной формируются участки с профилем выпуклой линзы. Наблюдались случаи, когда гетерогенное размножение двойниующих дислокаций на границе двойника приводило к полной аннигиляции всех дислокаций в устье и двойник отрывался от отпечатка. Из-за сложного влияния сопутствующего скольжения и случайных взаимодействий двойника с дефектами структуры не каждая прослойка проходит в своем развитии последовательно все стадии. Возможен переход от первой стадии к третьей, минуя вторую, полное застопоривание двойника или его деградация.

На основании анализа эволюции форм и размеров двойников с ростом интенсивности статических, импульсных и термомеханических воздействий выявлены микромеханизмы развития остаточного двойника в условиях сопутствующего скольжения: возбуждение источников и генерирование двойниующих дислокаций: движение двойниующих дисло-

каций в плоскости двойникования с образованием поверхности раздела; возбуждение источников двойникующих дислокаций на границах раздела и пробег двойникующих дислокаций в другой плоскости двойникования; гетерогенное зарождение петель двойникующих дислокаций на готовых границах раздела; трансляция двойникующих дислокаций вдоль двойниковых границ; аннигиляция двойникующих дислокаций разных знаков; возвратное движение двойникующих дислокаций; выход двойникующих дислокаций из кристалла.

Элементарные дислокационные процессы остаточного двойникования не имеют строгой последовательности, они могут чередоваться в любом (физически разумном) порядке или несколько процессов могут протекать одновременно, причем на разных границах двойника и даже на разных участках одной и той же границы возможны противоположные события, например, генерирование двойникующих дислокаций на среднем участке границы и аннигиляция у устья. В рамках предложенных дислокационных представлений находит объяснение все многообразие явлений, наблюдаемых при двойниковании металлических кристаллов.

Экспериментальные данные о развитии клиновидных механических двойников в металлах обобщены в физической модели роста клиновидного двойника в реальном кристалле. На основании концепции об определяющей роли взаимодействия двойникующих дислокаций со стопорами двух типов и разработана вероятностная математическая модель пробегов двойникующих дислокаций через сетку случайно распределенных препятствий. Показано, что для случаев действия больших статических или динамических нагрузок экспериментальные распределения плотности вероятностей длин клиновидных двойников в металлах аппроксимируются сложной композицией нормального и нескольких пуассоновских распределений:



$$p(x) = \frac{\exp\left(-\sum_{k=1}^m \lambda_k\right)}{\sqrt{2\pi(g^2 + a)}} \sum_{q_k=0}^{\infty} \frac{\lambda_1^{q_1} \lambda_2^{q_2} \dots \lambda_m^{q_m}}{q_1! q_2! \dots q_m!} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{\left(x - \left(L_0 - \sum_{k=1}^m k\lambda_k\right) - \sum_{k=1}^m kq_k\right)^2}{2(g^2 + a)}\right).$$

Надежная корреляция экспериментальных и расчетных графиков распределений клиновидных двойников по длинам и проверка качества аппроксимации по методу Пирсона подтверждают обоснованность развитого статистического подхода к описанию движения двойникующих дислокаций в реальном кристалле, адекватность полученной обобщенной аналитической функции, аппроксимирующей экспериментальные распределения двойников по длинам, и правильность физической гипотезы о скачкообразном росте остаточного клиновидного двойника в металле.

**Четвертая глава** посвящена изложению метода моделирования и описания механических свойств единичных двойниковых прослоек, основанный на установленном Гарбером сходстве механического поведения под нагрузкой единичной двойниковой прослойки и кристаллического макрообразца. Показано, что в зависимости от способа деформирования двойниковая прослойка проявляет различные механические свойства: упругость, пластичность, вязкость, прочность, то есть она обладает всеми основными реологическими свойствами и при нагружении и разгрузке ведет себя как упруго-вязко-пластичное тело, напряженно-деформированное состояние которого можно описывать в терминах механики сплошных сред. Сформулированы основные положения моделирования, указана обоснованность и область применимости метода. Модели,

построенные с учетом указанных положений, применимы к изучению механического поведения единичных деформационных двойников при первичном нагружении, действии знакопеременных и импульсных нагрузок, а также при других способах деформирования.

Построена обобщенная модель кристалла с двойником, которая наиболее полно отражает механическое поведение единичной двойниковой прослойки с учетом упругих и пластических параметров сдвойникового объема, свойств движущихся границ прослойки, существования пределов текучести у двойниковых границ и сопутствующего скольжения. Элементы обобщенной модели отражают различные взаимосвязанные деформационные процессы. Реологическое поведение такой модели при различных режимах нагружения весьма сложно, определяющее уравнение сдвойникового металла, полученное на ее основе, является дифференциальным уравнением 2-го порядка.

$$\frac{1}{G_2} \ddot{\tau} + \left( \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} + \frac{G_1}{G_2 \eta_1} \right) \dot{\tau} + \frac{G_1}{\eta_1 \eta_2} \tau = \ddot{\varepsilon} + \frac{G_1}{\eta_1} \dot{\varepsilon}.$$

Здесь  $G_1$  – упругий модуль двойниковой границы,  $G_2$  – упругий модуль матрицы кристалла,  $\tau_{i\bar{d}1}$  и  $\tau_{i\bar{d}2}$  – пределы текучести для скольжения в сдвойникованной части кристалла и матрице, соответственно. Параметр  $\tau_{i\bar{d}1}$  может означать также и предельные напряжения, при которых двойниковая граница начинает перемещаться. Параметры  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – коэффициенты вязкости, которую испытывает двойниковая граница при движении в сторону сдвойникового объема (раздвойникование) и в сторону несдвойникованной части кристалла (прямое двойникование). Аналитические результаты, полученные на основании этого уравнения, трудно сопоставить с экспериментальными зависимостями  $\varepsilon(\tau)$ . Однако

в частных случаях модель упрощается и позволяет описывать напряженно-деформированные состояния двойнящихся металлов под действием различного рода нагрузок линейными дифференциальными уравнениями, допускающими строгие аналитические решения, адекватную интерпретацию результатов моделирования и их экспериментальную проверку.

Метод реализован на примерах описания механического поведения единичных двойниковых прослоек в висмуте, сурьме, цинке и бериллии при различных режимах деформирования. Проанализированы установившиеся процессы деформации двойникованием под действием повторных и циклических нагрузок, изучено влияние режима знакопеременного нагружения на деформирование сдвойникового кристалла, дано количественное описание развития двойниковой прослойки при пульсации напряжений и отдыха двойникованных металлов. Проведена экспериментальная проверка результатов моделирования. Установлена взаимосвязь феноменологических параметров определяющих уравнений сдвойникового кристалла с характеристиками дислокационной структуры двойниковых границ.

**В пятой главе** предложен единый макроскопический подход к теоретическому анализу явлений пластификации и упрочнения на двойниковых границах.

Для количественного описания механических свойств остаточных деформационных двойников необходимо знать распределение двойнящихся дислокаций на границах раздела, эволюцию этого распределения при изменении напряжений в кристалле, длину свободных от стопоров сегментов дислокаций, стартовые напряжения движений дислокаций, конфигурацию поля упругих напряжений в окрестностях двойниковых границ и др. Получение таких сведений затруднительно из-за отсутствия

надежных методов выявления двойникующих дислокаций в металлах. Однако анализ экспериментальных данных, в частности гистерезисных свойств единичных двойниковых прослоек, позволяет развить модельные представления о кинетике деформационного двойникового металлов. Сопоставление результатов расчетов с экспериментом позволяет получать информацию об изменении дислокационной структуры двойниковых границ при пульсирующих и знакопеременных напряжениях.

В работе изучена диссипация энергии на единичных двойниковых прослойках. Показано, что удобным способом определения истинного значения декремента затухания, связанного со смещением границ единичных двойников, является изучение механического гистерезиса при напряжениях, соответствующих упругому изменению размеров остаточных двойников. Вычисление декремента затухания  $Q^{-1}$  для единичных двойников из гистерезисных петель проводилось с помощью определяющего уравнения модели стандартного твердого тела, которая наиболее полно отражает гистерезисные свойства двойниковых границ в металлах. Полученное таким способом значение декремента затухания относится не ко всему образцу и определяется релаксационными процессами только в окрестностях двойниковых границ. Вычисля локальный декремент затухания из гистерезисных петель двойниковых границ в кристаллах с различной дислокационной структурой матрицы, можно получить сведения о структурной чувствительности декремента затухания единичных двойников.

Проведены экспериментальные исследования диссипации энергии на единичных двойниках в кристаллах висмута и его сплавов. Экспериментальные значения декремента затухания, полученные путем изучения гистерезисных петель для единичных двойников в исследованных металлах,

близки по значению к расчетным, что свидетельствует о правомерности использования модели линейного стандартного твердого тела для расчета декремента внутреннего трения единичных двойников. Определение декремента затухания для отдельных элементов структуры деформированного кристалла по петлям упругого гистерезиса дает дополнительные возможности для изучения механизма пластической деформации, взаимодействия дефектов, выявления роли различных факторов в деформационном упрочнении кристаллов.

Экспериментально установлено, что если в кристаллах цинка возникает несколько двойниковых прослоек одновременно, то с ростом числа двойниковых границ декремент затухания быстро убывает. Двойниковые границы препятствуют расширению петель небазисных дислокаций в областях, прилежащих к двойниковым границам, что и приводит к уменьшению декремента затухания. Для количественного описания явления использовалось приближение стандартного твердого тела применительно

к случаю, когда в кристалле имеется  $N$  двойниковых границ, то есть  $\frac{N}{2}$

двойниковых прослоек. Уменьшение внутреннего трения в цинке при введении двойниковых прослоек, согласно рассмотренной модели, может быть обусловлено наличием сдвиговой деформации по границам раздела. Появление двойниковых границ в кристалле позволяет пластической деформации реализовываться как путем скольжения, так и за счет размножения, возвратно-поступательного перемещения и аннигиляции двойникующих дислокаций. Благодаря меньшему значению вектора Бюргерса частичные дислокации могут перемещаться в кристалле с большими скоростями. Двойникующие дислокации не образуют дислокационных скоплений в одной кристаллографической плоскости. Все это обуславливает

увеличение доли двойникования в общей деформации кристалла и приводит к уменьшению внутреннего трения.

Результаты экспериментального изучения релаксационных явлений на остаточных двойниковых прослойках с большой степенью некогерентности границ, обусловленных тем, что после разгрузки кристалла границы движутся в направлении, противоположном их перемещению в процессе нагружения, проанализированы на дислокационном уровне по аналогии с рассмотрением процесса неустановившейся ползучести металлического макрообразца. Выполнено дислокационное описание гистерезисных петель при нагружении и разгрузке сдвойникового кристалла в упругой области утолщения клиновидных двойниковых прослоек. Развитый подход позволяет путем анализа экспериментальных данных о зависимости площади гистерезисной петли, которая представляет собой меру диссипации упругой энергии на двойниковых границах при нагружении и разгрузке кристалла, от напряжения оценивать величину плотности дислокаций леса в кристалле. Это дает информацию о характере протекания сопутствующего скольжения при различных условиях развития двойниковой прослойки, необходимую для понимания механизма взаимодействия двойникования и скольжения. Определенная таким способом плотность полных дислокаций характеризует дислокационную структуру кристалла непосредственно в окрестностях границ остаточной двойниковой прослойки, для которой снимались соответствующие экспериментальные зависимости. Плотность полных дислокаций вблизи границ двойника может быть на 2–3 порядка выше средней плотности дислокаций в матрице кристалла. Расчетная величина плотности дислокаций учитывает дислокации всех возможных плоскостей скольжения, в то время как методика избирательного травления дает информацию лишь о дислокациях, выходящих на плоскость, подвергнутую действию травителя.

Для изучения феноменологических параметров макроскопической теории остаточных двойниковых прослоек в металле, описывающих упругие и вязкопластичные свойства двойниковых границ и матрицы, проведено экспериментальное изучение зависимостей площадей гистерезисных петель в упругой области от максимальных напряжений сдвига для клиновидных двойников в монокристаллах висмута и его сплавов при деформировании кристалла чистым изгибом. Вычислены микроскопические параметры двойникования по площадям гистерезисных петель.

При известном механизме, контролирующем скорость утолщения остаточной двойниковой прослойки, параметры феноменологической теории приобретают вполне определенный смысл, что позволяет количественно описать различные кинетические явления на двойниковых границах. Для клиновидных двойников и сквозных двойников с некогерентными границами в условиях неоднородного деформирования контролирующим механизмом является термоактивированное пересечение двойникующими дислокациями полных дислокаций, обеспечивающих скольжение. В этих условиях изложенная теория находится в хорошем соответствии с результатами экспериментальных исследований. Теория применима во всех случаях, когда движение двойниковых границ сходно с установившейся или неустановившейся ползучестью (в частности, при малых скоростях нагружения), причем смысл параметров теории соответствует конкретному механизму, контролирующему движение двойникующих дислокаций.

Проведено количественное описание упрочнения двойниковых границ при повторных нагружениях и экспериментально определены параметры упрочнения двойниковых границ при повторных нагружениях. Количественные меры эффекта разупрочнения измерялись для клиновидных и сквозных двойников как в прямом (двойникование), так и в обратном

(раздвойникование) направлениях. Параметры разупрочнения зависят от степени предварительной деформации, скорости деформирования, дислокационной структуры кристалла.

Характер упрочнения при прямом и обратном двойниковании оказался сходным. Это естественно, поскольку разница между этими процессами состоит лишь в том, что при прямом двойниковании двойникующие границы движутся в сторону матрицы, а при обратном – в сторону сдвойникового объема. Сопутствующее скольжение развивается в сдвойникованном объеме в большей степени, чем в матрице, что и обеспечивает некоторое количественное отличие в протекании всех описанных выше явлений.

Легирующие добавки приводят к подавлению эффекта потери упрочнения при промежуточной разгрузке во всех металлах. При больших концентрациях легирующих добавок упрочнение двойниковых границ, накопленное при первом нагружении, сохраняется после разгрузки.

Хорошее согласие теории с экспериментом означает, что она правильно описывает особенности механизмов упрочнения двойниковых границ в металлах.

Сделаны экспериментальные оценки феноменологических параметров макроскопического описания и выяснен их дислокационный смысл.

Выводы теории сопоставляются с экспериментальными данными и обсуждаются границы ее применимости.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан и реализован комплексный методологический подход к изучению деформационного двойникования металлических кри-



сталлов, включающий получение воспроизводимой экспериментальной информации о кинетике развития остаточных двойников, физически обоснованное моделирование и количественное описание механических свойств двойниковых прослоек при различных режимах нагружения.

2. Исследовано зарождение остаточных клиновидных двойников под действием сосредоточенной нагрузки в металлах с ромбоэдрической и гексагональной решетками при статическом, импульсном и термомеханическом воздействиях. Установлено, что деформационное двойникование проявляется как процесс релаксации внутренних напряжений, создаваемых внешней нагрузкой, в областях кристалла, наиболее искаженных локальным скольжением. При микроиндентировании деформационные двойники зарождаются у концентраторов напряжений, задаваемых индентором и случайными дефектами структуры у отпечатка, у скоплений полных дислокаций на линиях скольжения или на скоплениях двойникоующих дислокаций на границах ранее возникших двойников. Исследования силовых, температурных и временных зависимостей интенсивности двойникования показали, что при разных условиях нагружения зарождение клиновидных двойников контролируется концентраторами напряжений различной физической природы.

3. Обнаружено и изучено гетерогенное зарождение двойниковых прослоек в висмуте, сурьме и цинке при термоциклировании в интервале температур  $77 \Leftrightarrow 373$ . Показано, что образование двойниковой текстуры в поверхностных слоях монокристаллов приводит к их пластификации.

4. Проведено комплексное экспериментальное изучение эволюции размеров и формы клиновидных двойниковых прослоек в условиях предшествующего и сопутствующего скольжения с ростом внешней сосредоточенной нагрузки. Установлено, что на стадии остаточного двой-

нирования в металлах отсутствует однозначное соответствие между величиной нагрузки, размерами и формой двойника. Изменение размеров клиновидных двойников происходит неравномерно, непропорционально, несинхронно и неоднозначно; нарушается корреляция между процессами генерирования и перемещения двойникующих дислокаций на границах раздела.

5. Систематизированы формы клиновидных двойниковых прослоек. Сделан вывод о том, что конфигурация двойниковой границы зависит от дислокационного механизма, определяющего ее формирование. При гомогенном генерировании двойникующих дислокаций точечными источниками клиновидные двойники имеют прямолинейные или криволинейные границы, образованные дислокациями одного знака; дислокации другого знака выходят из кристалла, создавая на поверхности характерную ступеньку. При гетерогенном размножении двойникующих дислокаций линейными источниками границы двойников состоят из дислокаций обоих знаков и имеют профиль сечения линзы.

6. Детально изучены проявления обратимости двойнирования на границах остаточных двойниковых прослоек в металле при увеличении знакопостоянных внешних механических напряжений. Перераспределение деформации на границах двойника в ансамбле определяется характером напряженного состояния в окрестностях его границ. Локальные поля упругих напряжений в зависимости от величины и знака могут стимулировать двойникование, препятствовать ему или вызывать раздвойникование. Разные варианты изменения клиновидных двойников в группе у отпечатка с ростом внешнего усилия могут происходить одновременно.

7. Выявлена стадийность в развитии клиновидного деформационного двойника, определяемая степенью и характером некогерентности двойниковых границ. Формирование остаточной двойниковой прослойки

под нагрузкой происходит в следующей последовательности: образование ансамбля двойникоующих дислокаций одного знака; сжатие дислокационного ансамбля и разрушение поля ориентированных напряжений; возбуждение на границах раздела гетерогенных источников двойникоующих дислокаций с последующим закономерным изменением геометрии двойниковой границы.

8. Установлены микромеханизмы двойникования и раздвойникования кристаллической решетки при наличии скольжения. Показано, что на разных границах клиновидного двойника и даже на разных участках одной и той же границы возможны противоположные дислокационные процессы. В рамках предложенных дислокационных представлений находит объяснение все многообразие явлений, наблюдаемых при двойниковании металлических кристаллов.

9. На основе физической концепции о скачкообразном движении двойникоующих дислокаций в реальном кристалле развито статистическое описание пробегов двойникоующих дислокаций через сетку случайно распределенных препятствий. Показано, что для случаев действия больших статических или динамических нагрузок экспериментальные распределения плотности вероятностей длин клиновидных двойников в металлах аппроксимируются сложной композицией нормального и нескольких пуассоновских распределений.

10. Предложен единый подход к моделированию и количественному макроскопическому описанию механического поведения единичных двойниковых прослоек в металлах, сформулированы основные положения моделирования, обоснована область применимости. Получены аналитические решения дифференциальных уравнений напряженно-деформированного состояния сдвойникованных кристаллов для различных режимов нагружения. Установлена связь феноменологических пара-

метров с дислокационными характеристиками двойниковых границ и структурой кристалла. Проведена экспериментальная проверка результатов моделирования, убедительно подтверждающая достоверность физической гипотезы о сходстве механических свойств единичных двойниковых прослоек и кристаллических материалов.

11. Выполнено макроскопическое описание внутреннего трения и упрочнения металлов при двойниковании. На основании оценок релаксационных явлений при упругом смещении двойниковых границ установлена связь между локальным и макроскопическим декрементами затухания в сдвойникованных кристаллах. Вычислены времена релаксации внутренних напряжений для двойниковых прослоек с разной структурой границ. Проведены измерения декремента затухания и параметров эффекта потери упрочнения на единичных двойниковых прослойках в металлах с гексагональной и ромбоэдрической структурами.

12. Даны дислокационные трактовки феноменологических параметров описания остаточного двойникования в металле, в основу которых положены представления о термофлуктуационном характере преодоления двойникующими дислокациями препятствий. Для легированных кристаллов висмута проведено сравнение количественных значений феноменологических и кинетических параметров, полученных из теории и эксперимента. Установлена связь макро- и микрохарактеристик ансамбля двойникующих дислокаций, образующих двойниковую прослойку. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует в пользу объективности физической модели остаточной двойниковой прослойки в реальном кристалле в виде скопления двойникующих дислокаций мезоскопического масштаба, эволюция которого под воздействием внешних механических напряжений обусловлена коллективными и индивидуальными свойствами дислокаций.

**Список основных публикаций по теме диссертации:**

1. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Изменение формы клиновидных двойников в кристаллах висмута при длительных выдержках под нагрузкой // Физ. металлов и металловедение. – 1980. – Т. 49, № 2. – С. 443–445.
2. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Двойникование кристаллов висмута при термоциклировании // Инженерно-физический журнал. – 1980. – Т. XXXIX, № 1. – С. 148–149.
3. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Кинетика образования клиновидных двойников в кристаллах висмута // Физ. металлов и металловедение. – 1981. – Т. 51, № 5. – С. 1066–1072.
4. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Новый вид взаимодействия двойникования и скольжения // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 259, № 3. – С. 582–583.
5. Калоша В. К., Лобко С. И., Чикова Т. С. Математическая обработка результатов эксперимента. – Минск.: Выш. школа, 1982. – 103 с.
6. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Юдин М. Д. Роль стопоров в развитии клиновидных двойников в металлических кристаллах / Мозырский гос. пед. институт. – Мозырь, 1983. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 20.05.83. – № 2728-83 // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1983. – № 6. – С. 113.
7. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Юдин М. Д. Распределение трещин по размерам в кристаллических телах // Докл. АН БССР. – 1983. – Т. XXVII, № 4. – С. 326–328.
8. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Развитие ансамблей клиновидных двойников в радиально спадающих полях напряжений в металлических кристаллах / Мозырский гос. пед. институт. – Мозырь, 1988. – 13 с. – Деп. в ВИНТИ 20.09.88. – № 7043-B88.

9. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Развитие поверхностей раздела двойников в кристаллах сурьмы при действии статической нагрузки и импульсов электрического тока // Изв. вузов. Физика. – 1990. – № 4. – С. 120–122.
10. Чикова Т. С. Развитие механических двойников в кристаллах висмута при термомеханической обработке // Физика и химия твердого тела: Труды IV Международной школы-симпозиума. – Благовещенск: Изд-во АНЦ ДВО РАН, 1994. – С. 49.
11. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Раздвойникование кристаллов висмута, вызванное скольжением // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материала: Труды XXXVI Международного семинара «Актуальные проблемы прочности». 26-29 сент. 2000 г. – Витебск, 2000. – С. 434–439.
12. Башмаков В.И., Чикова Т.С. Пластификация и упрочнение металлических кристаллов при механическом двойниковании. – Минск: Техно-принт, 2001.–218 с.
13. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Электро- и акустостимулирование пластической деформации двойникованием // XXXVII Международный семинар «Актуальные проблемы прочности»: Тез. докл. – Киев, 2001. – С. 425–426.
14. Чикова Т. С., Ющенко И. П. Реологическая модель остаточной двойниковой прослойки в металле // XXXVII Международный семинар «Актуальные проблемы прочности»: Тез. докл. – Киев, 2001. – С. 411–412.
15. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Математическое моделирование роста остаточного клиновидного двойника в реальном кристалле // Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы: Материалы XXXVIII Междунар. семинара «Актуальные проблемы прочности». – СПб., 2001. – Ч. 1. – С. 223–228.

16. Чикова Т. С. Количественное описание внутреннего трения сдвоенных металлических кристаллов // Сплавы с эффектом памяти формы и другие перспективные материалы: Материалы XXXVIII Международ. семинара «Актуальные проблемы прочности». – СПб., 2001. – Ч. 1. – С. 229–232.
17. Чикова Т. С., Шавловская И. П., Ющенко И. П. Зарождение клиновидных двойников у концентраторов напряжений в висмуте // Вестник ГрГУ. – 2001. – Вып 2(6), сер. 2. – С. 64–70.
18. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Феноменологический анализ гистерезисных свойств двойниковых границ // 70 лет секции прочности и пластичности материалов им. Н. Н. Давиденкова: Тез. докл. XIII Петербургских чтений по проблемам прочности – СПб., 2002. – С. 96.
19. Чикова Т. С. Зарождение двойников при индентировании металлов // 70 лет секции прочности и пластичности материалов им. Н. Н. Давиденкова: Тез. докл. XIII Петербургских чтений по проблемам прочности – СПб., 2002. – С. 95.
20. Чикова Т. С., Сергиевич Н. В. Математическое моделирование роста клиновидного механического двойника в реальном кристалле. – Мозырь, 2002. – 61 с. – (Препринт / Моз.ГПУ; № 2, ISBN 985-477-016-8).
21. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Эволюция геометрии двойниковых границ в висмуте при увеличении нагрузки // Кристаллография. – 2002. – Т. 47, № 3. – С. 537–542.
22. Чикова Т. С. Упрочнение металлических кристаллов при механическом двойниковании // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела: Сборник трудов научной школы академика Н. Н. Новожилова. – СПб., 2002, – Вып. 5. – С. 81–99.
23. Чикова Т. С. Дислокационный анализ параметров феноменологической теории упрочнения двойникующихся металлов // Нелинейные про-

- блемы механики и физики деформируемого твердого тела: Сборник трудов научной школы академика Н. Н. Новожилова. – СПб., 2002, – Вып. 6. – С. 29–37.
24. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Моделирование механических свойств единичных двойниковых прослоек // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Тез. докл. – СПб., 2003. – С. 93–94.
25. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Дуб Н. Н. Особенности механического двойникования металлических кристаллов // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Тез. докл. – СПб., 2003. – С. 95–96.
26. Чикова Т. С. Скачкообразный рост клиновидных механических двойников // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности: Тез. докл. – СПб., 2003. – С. 97–98.
27. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Дуб Н. Н. Влияние электромеханического воздействия на развитие пластической деформации двойникованием // Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 19. Под ред. И.П.Филонова. – Минск: «Технопринт», 2003. – С. 587–591.
28. Чикова Т. С. Микромеханизмы деформационного двойникования металлических кристаллов // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2003. – Т. 8, Вып 4. – С. 598–600.
29. Башмаков В. И., Чикова Т. С., Дуб Н. Н. Двойникование и раздвойникование сдвойникованных кристаллов висмута и цинка при индентировании // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2003. – Т. 8, Вып. 4. – С. 601–603.
30. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Диссипация энергии на единичных двойниках в кристаллах висмута и сплавов // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела: Сборник трудов научной школы академика Н. Н. Новожилова. – СПб., 2003, – Вып. 7. – С. 127–138.



31. Чикова Т. С. Дислокационная теория релаксационных явлений на границах остаточных двойниковых прослоек // Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела: Сборник трудов научной школы академика Н. Н. Новожилова. – СПб., 2003, – Вып. 7. – С. 10–126.
32. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Анизотропия микротвердости, обусловленная двойникованием // XLII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности»: Тез. докл. – Калуга, 2004. – С. 64.
33. Чикова Т. С. О стадийности развития механического клиновидного двойника // XLII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности»: Тез. докл. – Калуга, 2004. – С. 65.