

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

*УДК 539.21*

**ОСТРИКОВ**  
**Олег Михайлович**

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЕРДЫХ  
ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ  
ДВОЙНИКАМИ И ПОЛОСАМИ СДВИГА  
НА СТАДИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете и учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

Научный консультант

**ВАСИЛЕВИЧ Юрий Владимирович**,  
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов машиностроительного профиля» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты:

**ЧИЖИК Сергей Антонович**,  
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, Главный ученый секретарь НАН Беларуси;

**ЖУРАВКОВ Михаил Анатольевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор Белорусского государственного университета;

**СТАРОВОЙТОВ Эдуард Иванович**,  
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика» УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Оппонирующая организация

**ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»**

Защита состоится 21 июня 2011 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02. 05. 07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 20 мая 2011 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат физико-математических  
наук, доцент



В.А. Нифагин

© Остриков О.М., 2011

© БНТУ, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение инициированных локализацией внутренних напряжений на неоднородностях процессов разрушения деформируемых твердых тел является важной научной проблемой. Для ее решения необходима разработка специальных методов расчета смещений, деформаций и напряжений, учитывающих накопление повреждений, чему посвящены фундаментальные труды известных механиков Ю.Н. Работнова, П.А. Витязя, В.В. Клубовича, Н.К. Мышкина, Ю.М. Плескачевского, М.А. Журавкова, М.Д. Мартыненко, Э.И. Старовойтова, В.И. Владимировича, С.В. Шилько и др. Актуальность проблематики привела к тому, что в настоящее время сформировалось современное научное направление: микро- и наномеханика, развиваемое в Республике Беларусь под руководством С.А. Чижика и в данной работе.

В рамках механики деформируемого твердого тела при использовании гипотезы сплошности среды существенное развитие получила континуальная теория дислокаций, в основу которой положено абстрагирование от атомного строения вещества, что позволило в рамках механики разработать дислокационный подход к моделированию разрушения материалов. Несмотря на достижения современной механики разрушения, недостаточное внимание уделено исследованию влияния возникающих в твердых телах при силовом воздействии двумерных дефектов на процесс зарождения микротрещин, что не оправдано, так как данные дефекты способствуют энергетической выгоде процесса разрушения на таких стадиях деформирования материалов, когда их ресурс прочности еще не исчерпан.

Решение задач механики деформируемого твердого тела, в большинстве случаев не предполагает учет напряжений, которые создают дефекты кристаллической решетки. Такие двумерные дефекты, как двойники в анизотропных телах и проявление негомогенной пластичности в изотропных твердых телах, создают локализацию напряжений, уровень которых иногда соизмерим с пределом прочности материала, что приводит к образованию микротрещин и последующему разрушению. Поэтому пренебрежение ролью двумерных дефектов, образующихся в деформируемых сплошных средах, ведет к завышению оценки прочностных характеристик применяемых на практике материалов. Это особенно недопустимо в конструкциях, требующих при длительной их эксплуатации высокой степени надежности.

Двойникам и полосам сдвига присущи следующие характеристики, обеспечивающие хрупкое разрушение: высокие скорости развития двойниковых прослоек и полос сдвига и связанные с этим динамические эффекты; значительная концентрация напряжений на границах двойников, в полосах сдвига и в их вершинах; жесткость взаимодействия с двумерными и трехмерными неоднородностями твердых тел. Данные процессы в настоящее время рассматриваются лишь на эмпирическом уровне и оторвано от задач механики деформируемого твердого тела. Поэтому, несмотря на имеющиеся обширные экспериментальные данные по исследованию двойникования и негомогенной

пластичности, остается нерешенной важная научно-практическая проблема, заключающаяся в разработке моделей деформируемых сред с учетом двойникования и негомогенной пластичности. Решение этой проблемы позволит делать более точные оценки о степени надежности используемых на практике материалов, прогнозировать области зарождения трещин, дающих начало процессу разрушения, вести поиск эффективных методов обработки двойникующихся и аморфных материалов.

Создание новых моделей деформируемых сред с учетом локализации напряжений на двумерных дефектах невозможно без развития теории двойникования и негомогенной пластичности. Это обусловлено тем, что современные теории в большинстве случаев не дают возможности их применения в решении задач механики деформируемого твердого тела. Поэтому другой важной научной проблемой можно считать развитие теории двойникования и негомогенной пластичности деформируемых твердых тел.

Известны атомная, дислокационная, дисклинационная и макроскопическая модели двойникования кристаллов. Данные модели используют такие ограничения и приближения, в область адекватности которых не входит большой класс двойников, наблюдаемых в экспериментальных работах. Так, например, популярная в настоящее время дислокационная модель двойника использует приближение тонкого двойника, когда две его границы сливаются в одну, что, с одной стороны, не позволяет рассчитывать поля напряжений внутри двойника, а с другой – не позволяет рассматривать значительно чаще встречающиеся на практике двойники, длина которых соизмерима с шириной. Это еще раз указывает на то, что вопрос о разработке новых моделей, охватывающих более широкий класс двойников, и дающих возможность их использования в решении задач механики деформируемого твердого тела, является актуальным.

Все более широкое практическое применение находят быстрозакаленные сплавы со структурой, не имеющей дальнего порядка. С практической точки зрения к числу важных характеристик относятся механические свойства данных материалов, которые напрямую зависят от особенностей реакции, например, металлических стекол на их деформирование. Установлено, что при деформировании аморфных сплавов в очагах деформации зарождаются специфические полосы сдвига, являющиеся основным каналом негомогенной пластической деформации. Появление таких каналов способствует активизации процесса разрушения, так как вдоль полос сдвига энергетически выгодно образование трещин. Механика аморфных материалов, учитывающая особенности их реакции на внешнее силовое воздействие, в настоящее время отсутствует. Поэтому разработка моделей негомогенной пластичности аморфных материалов и решение на их основе задач механики деформируемых изотропных твердых тел является важной научной проблемой.

Таким образом, в настоящее время назрела необходимость в решении важных научных проблем, связанных с развитием теории двойникования и негомогенной пластичности и использованием результатов этих теорий для решения задач механики деформируемого твердого тела. Это позволит вписать в ме-

ханику деформируемого твердого тела новый «Механика двойникования и негомогенной пластичности», который существенно дополнит в научном и практическом направлениях раздел «Механика разрушения». Наличие нового раздела, посвященного ранее не рассматривавшимся с позиций механики родственным разрушению явлений, открывает новые возможности для широкого практического использования методов механики деформируемого твердого тела для находящих все большее практическое применение материалов нового поколения таких, как материалы с памятью формы, нанокристаллические материалы, металлические стекла и др.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационные исследования неоднократно поддерживались Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований в рамках проектов: Ф99М-025 «Реализация пластической деформации двойникованием при наноиндентировании монокристаллов висмута, облученных ионами различных веществ» (1999–2001 гг.); Ф05М-009 «Технология получения и физические свойства фазовых дифракционных решеток, сформированных на основе явления полисинтетического двойникования монокристаллов» (2005–2007 гг.); Ф07М-045 «Математическое и физическое моделирование процессов двойникования кристаллов» (2007–2009 гг.); Ф08-106 «Моделирование процессов деформирования монокристаллических и аморфных твердых тел при сопутствующей локализации напряжений на двумерных дефектах» (2008–2009 гг.); Т03-144 «Исследование особенностей процесса пластической деформации аморфных материалов на основе железа с наноструктурными фазовыми включениями» (2003–2005 гг.). Министерством образования Республики Беларусь поддержан проект № 20012106 «Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей высокоэнергетической обработкой» (2001–2002 гг.).

Диссертационная работа соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы: «7. Машиностроение. Системы и комплексы сельскохозяйственных машин. Контроль и диагностика в машиностроении: 7.1. механика, надежность, безопасность и экологичность машин, трение и износ в машинах, методы расчета, моделирования, проектирования, конструирования и испытаний машин, агрегатов и узлов» (Постановление совета министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 года № 585).

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является развитие теории двойникования и негомогенной пластической деформации и разработка методологии расчета напряженного состояния деформируемых твердых тел на стадии накопления повреждений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основании экспериментальных данных разработать дислокационные модели клиновидных и полисинтетических двойников, позволяющих не прибегая к модели тонкого двойника рассчитывать на различных масштабных уровнях поля смещений, деформаций и напряжений в деформируемых твердых телах при наличии в них двойников;

- сформулировать и решить задачу о напряженном состоянии твердого тела с локализацией пластической деформации на двумерных дефектах;

- на основании сравнительного анализа результатов расчетов напряженного состояния в упругом однородном и неоднородном полупространствах, деформируемых сосредоточенной или распределенной на участке поверхности нагрузкой при наличии и отсутствии двойника, показать необходимость учета вклада двумерных дефектов в формировании деформационной картины;

- разработать методику расчета напряженного и деформированного состояний в особой точке – вершине клиновидного двойника, а также изучить роль поверхности и дисбаланса количества дислокаций на двойниковых границах на напряженное состояние у клиновидного двойника;

- на основании энергетического расчета в рамках мезоскопической дислокационной модели получить взаимосвязь между микроскопическими и определяемыми экспериментально макроскопическими параметрами двойников для получения возможности ведения сравнительного анализа теоретических и экспериментальных результатов исследований;

- получить условие равновесия клиновидного двойника при дискретном и непрерывном суммировании вклада двойникующих дислокаций в процесс междислокационного взаимодействия, провести анализ эволюции равновесной формы двойника в зависимости от плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах и разработать модель развивающегося двойника;

- применить мезоскопическую дислокационную модель для расчета полей напряжений у нанодвойника линзовидной формы и полисинтетического двойника, изучить роль концентратора напряжений внутри наноразмерного двойникового зародыша в формировании у него напряженного состояния и применить принцип электростатической аналогии для решения трехмерной задачи по расчету полей напряжений у линзовидного двойника;

- на основании экспериментальных данных обосновать целесообразность квазидислокационного подхода к моделированию негомогенной пластической деформации аморфных материалов, разработать квазидислокационные модели, описывающие различные типы полос сдвига в аморфных материалах, и показать возможность расчета на основании данных моделей полей напряжений у единичных, ветвящихся и полисинтетических полос сдвига.

**Объектом исследования** являются изотропные и анизотропные твердые тела, подверженные при их деформировании двойникованию или негомогенной пластичности.

**Предмет исследования** – напряженно-деформированное состояние, сформированное двойниками и полосами сдвига в деформируемом твердом теле.

Выбор объектов и предмета исследования обусловлен тем, что решение задач механики деформируемого твердого тела для двойникующихся и аморфных материалов обладает большой неточностью, так как двойники и полосы сдвига являются концентраторами больших (соизмеримых с пределом текучести, а порой, и пределом прочности материала) внутренних напряжений, существенным образом искажающими деформационную картину. Отсутствие в решении современных задач механики деформируемого твердого тела учета двойникования и неомогенной пластичности для ряда применяемых на практике двойникующихся и аморфных материалов приводит к существенно завышенной оценке их прочностных характеристик, так как высокий уровень напряжений у двойников и полос сдвига способствует зарождению у них микротрещин, приводящих к разрушению.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Мезоскопическая континуальная дислокационная модель двойника, использующая приближение дискретного расположения дислокаций на границах двойника и позволяющая учитывать роль винтовой и краевой составляющей вектора Бюргера частичной двойникующей дислокации, отличающаяся от известных моделей приближением линейности двойниковых границ, что позволило сделать экономичным способ суммирования вклада отдельных дислокаций в общую деформационную картину двойника. Модель дает возможность рассчитывать поля внутренних напряжений, смещений и деформаций у клиновидных, линзовидных и полисинтетических двойников и в результате энергетических расчетов позволила получить взаимосвязь геометрических параметров двойников с величиной внешней нагрузки и показать хорошее согласие этих параметров с экспериментальными данными.

2. Макроскопическая континуальная дислокационная модель клиновидного двойника, использующая приближение непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, но лишенная недостатков, присущих известной модели тонкого двойника и заключающихся в рассмотрении двойника на таком масштабном уровне, когда границы двойника сливаются в одну. Устранение данных недостатков позволило значительно расширить класс двойников, которые можно рассматривать в рамках разработанной модели, и решить проблему расчета полей напряжений внутри двойника. Это дало возможность для применения данной модели в более широком классе задач механики деформируемого твердого тела.

3. Методика расчета полей напряжений в упругом полупространстве, к поверхности которого приложены сосредоточенные или распределенные нагрузки, которая, в отличие от известных, позволяет учитывать напряжения, создаваемые клиновидными двойниками, что имеет важное значение, так как возникающие при локальном поверхностном деформировании двойники оказывают существенное (более  $10^6$  раз) влияние на конфигурацию внутренних полей напряжений, и дает возможность предложить способ управления прочностными характеристиками двойникующихся материалов путем использования такого способа внешнего деформирования, который позволит уменьшить активи-

рующие разрушение локализованные на двойниковых границах внутренние напряжения.

4. Методика расчета полей напряжений у точечного источника расширения или полной дислокации, находящихся внутри линзовидного нанодвойника, которая, в отличие от известных, впервые позволила изучить эволюцию полей напряжений у нанодвойника в зависимости от мощности находящегося внутри него точечного источника расширения или величины модуля вектора Бюргера полной дислокации.

5. Квазидислокационные модели негомогенной пластической деформации аморфных материалов и основанный на этих моделях метод расчета полей напряжений у полос сдвига, который, в отличие от известных, позволил установить, что распределение напряжений у полос сдвига в аморфных материалах проявляет схожесть с их распределением у границ двойников.

**Личный вклад соискателя.** Теоретические и экспериментальные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. Основные положения, выводы и рекомендации принадлежат автору, который выбрал научное направление, определил цель и задачи, разработал методологию исследований. Обсуждение результатов и консультирование по основным вопросам диссертации осуществлялось профессором Ю.В. Василевичем. Аморфные сплавы для ведения экспериментальных работ по изучению негомогенной пластической деформации предоставлены профессором М.Н. Верещагиным, который участвовал в обсуждении результатов, связанных с исследованием структуры и свойств аморфных материалов. В обсуждении и анализе результатов работы, проведении рентгеноструктурных исследований и изучении свойств аморфных материалов участвовал профессор В.Г. Шепелевич. Другие соавторы в совместных публикациях оказывали помощь в проведении экспериментальной части работы, выполнении отдельных компьютерных расчетов.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы доложены и обсуждены на конференциях: VII и VIII Международных конференциях «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» в г. Обнинске; X и XI Российских конференциях «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов» в г. Екатеринбурге; Международной конференции «Mechanics of Composite Materials» в г. Риге; Международной конференции «Мезоструктура» в г. Санкт-Петербурге; XXXVII Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» в г. Киеве; Международной конференции «Multiscale Materials Modeling» в г. Бостоне; II Гомельской региональной конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» в г. Гомеле; Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии обработки материалов давлением» в г. Минске; Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» в г. Гомеле; IV Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика – 2009» в г. Минске.



**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 92 научные работы, среди которых 2 монографии (одна монография написана без соавторов), 72 статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках (32 статьи без соавторов), 16 тезисов докладов на Международных конференциях (10 тезисов без соавторов) и 2 патента на изобретения. Общий объем публикаций составил 301 авторский лист.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 186 страницах, общий ее объем составляет 432 страницы, включая 291 рисунок, 4 таблицы, библиографию из 191 наименования и 4 приложения на 150 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 «Современные проблемы в области исследований двойникования и негомогенной пластичности деформируемых твердых тел» сделан обзор экспериментальных и теоретических работ в области исследования двойникования и негомогенной пластичности изотропных и анизотропных деформируемых твердых тел.

В настоящее время в литературе представлен обширный материал по результатам исследования двойникования кристаллов и негомогенной пластической деформации аморфных материалов. Существующие модели локализованной пластической деформации можно охарактеризовать как недостаточно развитые, не позволяющие описывать все классы двойников и полос сдвига, наблюдаемых при деформировании твердых тел. Отсутствуют имеющие важное практическое значение примеры решения задач механики деформируемого твердого тела с учетом напряжений, локализованных на двойниковых границах и полосах сдвига в аморфных материалах. Это указывает на наличие важной научной проблемы, заключающейся в необходимости разработки математических методов описания обширных экспериментальных данных и развитии теории двойникования кристаллов и негомогенной пластической деформации аморфных материалов и применение этой теории для решения задач механики деформируемого твердого тела.

На основании опытов Р.И. Гарбера И.М. Лифшицем бала предложена макроскопическая модель двойникования кристаллов. Эта модель позволила показать целесообразность представлений о нелинейной зависимости между тензором напряжений  $\sigma_{ik}$  и тензором деформаций  $\varepsilon_{ik}$ . Основным результатом, полученным И.М. Лифшицем в рамках развиваемой теории, является соотношение, позволяющее рассчитывать сдвиговую деформацию  $\varepsilon_{xy}$ , обусловленную двойником, имеющее вид

$$\varepsilon_{xy}(\vec{r}) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{A_{1i} F_i}{z_1} + \frac{A_{2i} F_i}{z_2} + f_0 \int_C \left[ \frac{A_{11} d\xi - A_{12} d\eta}{z_1 - \zeta_1} + \frac{A_{21} d\xi - A_{22} d\eta}{z_2 - \zeta_2} \right] \right\},$$

где  $z_i = x + \mu_i y$ ;  $\zeta_i = \xi + \mu_i \eta$ ;  $\mu_i$ ,  $A_{ki}$  – комплексные числа, связанные с константами упругости кристалла  $\lambda_{iklm}$ ;  $\xi$  и  $\eta$  – параметры интегрирования;  $F_i$  – сосредоточенная сила;  $f_0$  – интенсивность сосредоточенной силы.

Кроме теории двойникования И.М. Лифшица, большую популярность приобрела дислокационная модель двойника, результаты которой обобщены А.М. Косевичем и В.С. Бойко. Модель представляет собой аналог модели дислокационной трещины. Как и в теории трещин А.М. Косевичем и В.С. Бойко представлено условие равновесия тонкого двойника

$$\text{V.p.} \int_{a_0}^L \frac{\rho(\xi) d\xi}{\xi - x} - \int_{a_0}^L K(x, \xi) \rho(\xi) d\xi = \frac{1}{B_j} [\sigma(x) + S(x)] \equiv \omega(x),$$

где  $L$  – длина двойника;  $a_0$  – величина ступеньки, которую образует двойник на поверхности кристалла;  $\rho(\xi)$  – линейная плотность двойникующих дислокаций;  $K(\xi, x)$  – некоторая функция двух переменных;  $\sigma(x)$  – внешние напряжения;  $S(x)$  – напряжения на линии двойникования, эквивалентные наличию сил неупругого происхождения;  $B_j$  для краевой и винтовой дислокации соответственно имеет вид

$$B_{\text{кр}} = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)}, \quad B_{\text{в}} = \frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi}.$$

Здесь  $\mu$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $b_{\text{кр}}$  и  $b_{\text{в}}$  – модуль векторов Бюргера соответственно краевой и винтовой дислокации

Если  $S(x)$  известна, то, как это было показано А.М. Косевичем и В.С. Бойко, можно найти  $\rho(x)$  при заданной функции  $\omega(x)$ , которая удовлетворяет специальному условию ортогональности

$$\int_{a_0}^L \omega(x) \rho_0(x) dx = 0,$$

где  $\rho_0(x)$  – решение уравнения

$$\int_{a_0}^L K(\xi, x) \rho_0(x) dx = 0.$$

В аморфных материалах пластическая деформация реализуется гомогенно и негомогенно. Гомогенная пластическая деформация равномерно распределена по всему объему деформируемого твердого тела. Для такого типа деформации дислокационная модель в настоящее время разработана. Однако теория негомогенной пластичности аморфных материалов, локализованной в ограниченных объемах, в частности, в полосах сдвига, в настоящее время отсутствует, несмотря на имеющиеся обширные экспериментальные данные. Это указывает на наличие требующей решения проблемы по математическому моделированию негомогенной пластической деформации применительно к задачам механики деформируемого твердого тела.

**Глава 2 «Мезоскопическая дислокационная модель клиновидных двойников»** посвящена развитию мезоскопической дислокационной модели клиновидного двойника. В основу модели легли результаты экспериментальных исследований и математические подходы, принятые в континуальной теории дислокационных скоплений и полученные в рамках приближения сплошности среды, используемого в механике деформируемого твердого тела. При этом учтено, что двойникующая дислокация является частичной и ее вектор Бюргерса может быть разложен на краевую и винтовую составляющие. Разработан экономичный способ расчета полей напряжений, смещений и деформаций. Обобщенное соотношение для расчета, например, напряжений у клиновидного двойника на мезоскопическом уровне имеет вид

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sum_n \sigma_{ij}^{OA}(x - nd, y + nh) + \sum_m \sigma_{ij}^{OB}(x - md, y - mh),$$

где  $i$  и  $j$  принимают значения  $x$ ,  $y$  или  $z$ ;  $\sigma_{ij}^{OA}$  и  $\sigma_{ij}^{OB}$  – напряжения, создаваемые скоплениями дислокаций на границах  $OA$  и  $OB$  двойника соответственно;  $n$  и  $m$  – индексы суммирования;  $d$  и  $h$  – проекции соответственно на ось  $OX$  и  $OY$  отрезка, соединяющего две соседние двойникующие дислокации двойниковой границы.

В результате проведенных расчетов установлено, что напряжения и деформации локализуются на границах клиновидного двойника и у его вершины. Двойниковые границы способствуют искривлению линий равных значений смещений. Внутри клиновидного двойника напряжения и деформации неоднородны. Нормальные напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  локализованы у одной из двойниковых границ, а сдвиговые напряжения и напряжения  $\sigma_{zz}$  локализованы у вершины клиновидного двойника.

Во второй главе диссертации также представлены удобные для физического анализа математические соотношения для расчета напряжений и дефор-

маций у вершины двойника клиновидной формы. С использованием этих соотношений дана количественная оценка эволюции значений напряжений и деформаций у вершины двойника в зависимости от числа двойникующих дислокаций на двойниковых границах. При этом установлено, что с увеличением числа двойникующих дислокаций модуль напряжений и деформаций у вершины клиновидного двойника увеличивается, а скорость роста напряжений и деформаций уменьшается, что связано с увеличением длины двойника и изменением силы взаимодействия между двойникующими дислокациями. Количественными расчетами показано, что величина напряжений и деформаций у вершины двойника зависит от расстояния между соседними двойникующими дислокациями и отношения проекций этого расстояния на оси декартовой системы координат.

Получено соотношение для расчета полной энергии клиновидного двойника в зависимости от его геометрических параметров, что делает возможным связать экспериментально определяемые параметры с энергетическими характеристиками. Расчет энергии велся на основе суммирования упругой энергии, энергии взаимодействия между двойникующими дислокациями и энергии дефектов упаковки. При этом для упругой энергии, отнесенной к длине  $L_d$  всех двойникующих дислокаций получено соотношение

$$\frac{W_y}{\sum L_d} = \frac{\mu}{2\pi} \sum_{i=1}^{N-1} \left( b_B^2 \ln \frac{\alpha(L-id)}{b_B} + \frac{b_{кр}^2}{(1-\nu)} \ln \frac{\alpha(L-id)}{b_{кр}} \right) + \frac{\mu}{4\pi} \left( b_B^2 \ln \frac{\alpha L}{b_B} + \frac{b_{кр}^2}{(1-\nu)} \ln \frac{\alpha L}{b_{кр}} \right),$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $N$  – число двойникующих дислокаций на границе клиновидного двойника;  $i$  – индекс суммирования;  $b_B$  и  $b_{кр}$  – модуль винтовой и краевой составляющих вектора Бюргера двойникующей дислокации соответственно;  $\alpha$  – коэффициент;  $L$  – длина двойника;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Для энергии взаимодействия двойникующих дислокаций получено

$$\frac{W_{вз}}{\sum L_d} = - \left[ \frac{\mu}{\pi} \left( \frac{b_{кр}^2}{1-\nu} \sum_{i=1}^N (N-i) \ln \frac{i \sqrt{L^2 + \frac{H^2}{4}}}{b_{кр}(N-1)} + b_B^2 \sum_{i=1}^N (N-i) \ln \frac{i \sqrt{L^2 + \frac{H^2}{4}}}{b_B(N-1)} \right) \right] +$$

$$+ \frac{\mu}{2\pi} \left[ \frac{b_{\text{кр}}^2}{1-\nu} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \ln \frac{jH + \sqrt{(iL)^2 + \left(\frac{2j+i}{2}H\right)^2}}{b_{\text{кр}}(N-1)} + \right. \\ \left. + b_{\text{в}}^2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \ln \frac{jH + \sqrt{(iL)^2 + \left(\frac{2j+i}{2}H\right)^2}}{b_{\text{в}}(N-1)} \right],$$

где  $H$  – ширина двойника у устья;  $j$  – индекс суммирования.

Для энергии дефектов упаковки получено соотношение

$$\frac{\gamma}{\sum L_{\text{д}}} = \frac{\mu(b_{\text{кр}}^2 + b_{\text{в}}^2)N\sqrt{d^2 + h^2}}{2\pi(1-\nu)d_0} = \frac{\mu(b_{\text{кр}}^2 + b_{\text{в}}^2)N}{2\pi(1-\nu)d_0(N-1)} \sqrt{L^2 + \frac{H^2}{4}},$$

где  $d_0$  – равновесная ширина расщепленной дислокации.

В результате расчетов установлено, что на этапе зарождения двойника весомый энергетический вклад вносят упругая энергия и энергия дефектов упаковки, а дальнейшее развитие двойника преимущественно зависит от энергии взаимодействия двойникующих дислокаций. Получена взаимосвязь между модулем нормальной сосредоточенной силы  $P$ , действующей на поверхность двойникующегося твердого тела, и геометрическими параметрами  $L$  и  $H$  возникающего при этом двойника. Эта связь имеет вид

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 H}{4aJ_P} \left( -\frac{W}{\sum L_{\text{д}}} (L, H) \right)},$$

где

$$J_P = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2E} \frac{x^2(x^4 + y^4)}{(x^2 + y^2)^4} + \left( \frac{1}{\mu} - \frac{\nu}{E} \right) \frac{x^4 y^2}{(x^2 + y^2)^4} \right] dx dy.$$

На основании анализа баланса сил, действующих на вершинную двойникующую дислокацию, на мезоскопическом уровне получено условие равновесия клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений. При помощи данного условия выведено соотношение для определения величины сил не-

упругой природы, обеспечивающих равновесную форму двойника. Это соотношение имеет вид

$$\frac{\mu b_{\text{кр}}^2}{\pi(1-\nu)} \sum_{n=1}^N \frac{NL(N-n) \left[ L^2(N-n)^2 - \frac{1}{4}n^2 H^2 \right]}{\left[ L^2(N-n)^2 + \frac{1}{4}n^2 H^2 \right]^2} -$$

$$- \frac{\mu b_{\text{в}}^2}{\pi} \sum_{n=1}^N \frac{NL(N-n)}{L^2(N-n)^2 + \frac{1}{4}n^2 H^2} = S.$$

Показано, что с ростом длины клиновидного двойника обеспечение его равновесной формы осуществляется за счет увеличения значений неупругих сил.

Разработана мезоскопическая дислокационная модель развивающегося двойника, позволяющая в любой момент времени определять поля напряжений у клиновидного двойника с согласованно движущимися двойникующимися дислокациями. В модели учтен процесс генерирования двойникующихся дислокаций. Показано, что в этом случае фронт высокого уровня напряжений увлекается за движущейся вершиной двойника. Расчетные формулы для компонент тензора напряжений у движущихся со скоростью  $\nu$  двойникующихся дислокаций имеют вид:

$$\sigma_{xy}(x, y) = \frac{\mu b_{\text{кр}} c_t^2}{2\pi\nu^2} \left\{ \sum_{n=0}^N \left[ \frac{(1 + \gamma_t^2)^2 (x - L + nd_1 - vt)}{\gamma_t [(x - L + nd_1 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y + nh_1)^2]} - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{4\gamma_t (x - L + nd_1 - vt)}{(x - L + nd_1 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y + nh_1)^2} \right] + \sum_{m=1}^M \left[ \frac{(1 + \gamma_t^2)^2 (x - L + md_2 - vt)}{\gamma_t [(x - L + md_2 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y - mh_2)^2]} - \right.$$

$$\left. - \frac{4\gamma_t (x - L + md_2 - vt)}{(x - L + md_2 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y - mh_2)^2} \right] \left. \right\},$$

$$\sigma_{xx}(x, y) = \frac{b_{\text{кр}} c_t^2}{\pi\nu^2} \left\{ \sum_{n=0}^N \left[ \frac{\gamma_t (\lambda + 2\mu - \gamma_t^2 \lambda) (y + nh_1)}{(x - L + nd_1 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y + nh_1)^2} - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{\mu \gamma_t (1 + \gamma_t^2) (y + nh_1)}{(x - L + nd_1 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y + nh_1)^2} \right] + \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\gamma_t (\lambda + 2\mu - \gamma_t^2 \lambda) (y - mh_2)}{(x - L + md_2 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y - mh_2)^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{\mu \gamma_t (1 + \gamma_t^2) (y - mh_2)}{(x - L + md_2 - vt)^2 + \gamma_t^2 (y - mh_2)^2} \right] \left. \right\}.$$

$$\left. - \frac{\mu\gamma_t(1+\gamma_t^2)(y-mh_2)}{(x-L+md_2-vt)^2+\gamma_t^2(y-mh_2)^2} \right\},$$

$$\sigma_{yy}(x,y) = \frac{b_{\text{кр}}c_t^2}{\pi v^2} \left\{ \sum_{n=0}^N \left[ \frac{\gamma_l(\lambda-\gamma_l^2(\lambda+2\mu))(y+nh_1)}{(x-L+nd_1-vt)^2+\gamma_l^2(y+nh_1)^2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\mu\gamma_t(1+\gamma_t^2)(y+nh_1)}{(x-L+nd_1-vt)^2+\gamma_t^2(y+nh_1)^2} \right] + \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\gamma_l(\lambda-\gamma_l^2(\lambda+2\mu))(y-mh_2)}{(x-L+md_2-vt)^2+\gamma_l^2(y-mh_2)^2} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{\mu\gamma_t(1+\gamma_t^2)(y-mh_2)}{(x-L+md_2-vt)^2+\gamma_t^2(y-mh_2)^2} \right] \right\},$$

$$\sigma_{zz}(x,y) = v(\sigma_{xx}(x,y) + \sigma_{yy}(x,y)),$$

$$\sigma_{xz}(x,y) = -\frac{\mu b_B}{2\pi} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{\gamma_t(y+nh_1)}{(x-L+nd_1-vt)^2+\gamma_t^2(y+nh_1)^2} + \right.$$

$$\left. + \sum_{m=1}^M \frac{\gamma_t(y-mh_2)}{(x-L+md_2-vt)^2+\gamma_t^2(y-mh_2)^2} \right\},$$

$$\sigma_{yz}(x,y) = \frac{\mu b_B}{2\pi} \left\{ \sum_{n=0}^N \frac{\gamma_t(x-L+nd_1-vt)}{(x-L+nd_1-vt)^2+\gamma_t^2(y+nh_1)^2} + \right.$$

$$\left. + \sum_{m=1}^M \frac{\gamma_t(x-L+md_2-vt)}{(x-L+md_2-vt)^2+\gamma_t^2(y-mh_2)^2} \right\},$$

где  $c_t$  – скорость распространения поперечной звуковой волны;  $N$  и  $M$  – число двойникующих дислокаций на каждой из двойниковых границ;  $d_i$  и  $h_i$  – проекции соответственно на ось  $OX$  и  $OY$  отрезка соединяющего две соседние двойникующие дислокации на одной из двойниковых границ (индекс  $i$  принимает значение 1 или 2 и определяет принадлежность дислокации той или иной двойниковой границе);

$$\gamma_t = \left(1 - \frac{v^2}{c_t^2}\right)^{1/2}; \quad \gamma_l = \left(1 - \frac{v^2}{c_l^2}\right)^{1/2}$$

(здесь  $c_l$  – скорость продольных звуковых волн).

В главе 3 «Макроскопическая дислокационная модель заклинившихся двойников и ее применение в контактных задачах механики деформируемого твердого тела» развивается макроскопическая дислокационная модель клиновидного двойника. При этом двойник рассматривается на таком масштабном уровне, когда расстояние между двойникующими дислокациями пренебрежимо мало, а их распределение на двойниковых границах принимается непрерывным. Уровень абстрагирования не принимался таковым, что двойник можно считать тонким, когда две его границы сливаются в одну. Это позволило рассматривать значительно более широкий класс двойников, для которых неприменимо приближение тонкого двойника. Разработанная модель позволила вести расчет полей напряжений внутри двойника и учитывать вклад в напряженное состояние формы двойниковых границ.

По аналогии с результатами работы С.П. Киселева сделана постановка задачи деформируемого твердого тела с дислокациями применительно к двойникованию с непрерывным распределением двойникующих дислокаций на границах:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad \tilde{S}_{ij} - S_{ij}^r = 0, \quad \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij} < \frac{2}{3} Y_s^2,$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + S_{ij}, \quad p = -K \varepsilon_{kk}^e, \quad S_{ij} = 2\mu e_{ij}^e, \quad K = \lambda + \frac{2\mu}{3},$$

$$e_{ij}^{(e)} = \varepsilon_{ij}^{(e)} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^{(e)} \delta_{ij}, \quad \varepsilon_{ij}^{(e)} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon_{ij}^p, \quad \varepsilon_{ij}^p = \frac{1}{2} (\beta_{ij} + \beta_{ji}),$$

$$\tilde{S}_{ij} = S_{ij} + S'_{ij}, \quad S'_{ij} = \sigma'_{ij} - \frac{1}{3} \sigma'_{kk} \delta_{ij}, \quad \sigma'_{ij} = -C \varepsilon_{jkl} \frac{\partial \alpha_{li}}{\partial x_k}, \quad \alpha_{ji} = \varepsilon_{jps} \frac{\partial \beta_{pi}}{\partial x_s},$$

где  $u_i$  – компоненты вектора перемещений;  $\beta_{ij}$  – тензор пластической дисторсии;  $S_{ij}$  – тензор девиатора напряжений;  $\tilde{S}_{ij}$  – девиатор полных напряжений;  $S_{ij}^r$  – тензор сил трения покоя;  $Y_s$  – предел текучести материала;  $e_{ij}$  – тензор девиатора деформаций;  $\alpha_{ji}$  – тензор плотности дислокаций;  $\varepsilon_{ijk}$  – абсолютно антисимметричный тензор Леви-Чивиты;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $p$  – давление;  $K$  – модуль объемного сжатия; индекс  $(e)$  обозначает упругие деформации; индекс  $p$  обозначает пластические деформации;  $\sigma'_{ij}$  – вихревые самоуравновешенные силы, определяемые по формуле



$$\sigma'_{ij} = -C' \varepsilon_{jkl} \frac{\partial \alpha_{li}}{\partial x_k} = -C' \varepsilon_{jkl} \varepsilon_{lsp} \frac{\partial^2 \beta_{pi}}{\partial x_k \partial x_s},$$

где  $C'$  – константа.

Граничные условия для рассматриваемой задачи ненагруженного упругого полупространства имеют вид:

$$f_i = \sigma_{ij} n_j, \quad \varepsilon_{kjl} n_j \alpha_{li} = 0,$$

где  $f_i$  – поверхностная сила;  $n_j$  – компоненты вектора нормали к поверхности.

Установлено, что в случае двойникования пластическая деформация локализована у двойниковых границ и может быть определена по формулам:

$$\varepsilon_{xx}^p(x, y) = \frac{A'_1}{\pi N_{\text{пл}}^2 a^2} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f'_1(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N_{\text{пл}}^2 a^2}} dx_0 + \right. \\ \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f'_2(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N_{\text{пл}}^2 a^2}} dx_0 \right],$$

$$\varepsilon_{xy}^p(x, y) = \frac{A'_2}{\pi N_{\text{пл}}^2 a^2} \left[ \int_0^L \sqrt{1 + (f'_1(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_1(x_0))^2}{2N_{\text{пл}}^2 a^2}} dx_0 + \right. \\ \left. + \int_0^L \sqrt{1 + (f'_2(x_0))^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-f_2(x_0))^2}{2N_{\text{пл}}^2 a^2}} dx_0 \right],$$

где  $A'_1$  и  $A'_2$  – константы;  $N_{\text{пл}}$  – число плоскостей, между которыми распределены двойникующие дислокации;  $f_1(x_0)$  и  $f_2(x_0)$  – функции, определяющие форму двойниковых границ;  $x_0$  – параметр интегрирования.

На рисунке 1 схематически представлен клиновидный двойник, плотности двойникующих дислокаций на границах которого равны  $\rho_1$  и  $\rho_2$ . Тогда напряжения, создаваемые рассматриваемым клиновидным двойником, с позиций развиваемой макроскопической дислокационной модели могут быть определены из формулы

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sigma_{ij}^{(1)}(x, y) + \sigma_{ij}^{(2)}(x, y),$$

где

$$\sigma_{ij}^{(1)} = \int_{L_{AB}} \rho_1 \sigma_{ij}^{(1,0)} ds; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{(2)} = \int_{L_{CB}} \rho_2 \sigma_{ij}^{(2,0)} ds. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_{ij}^{(1)}$  и  $\sigma_{ij}^{(2)}$  – напряжения, создаваемые каждой из границ клиновидного двойника и определяемые с помощью криволинейного интеграла вдоль профилей двойниковых границ  $L_{AB}$  и  $L_{CB}$  соответственно (рисунок 1);  $\sigma_{ij}^{(1,0)}$  и  $\sigma_{ij}^{(2,0)}$  – напряжения, создаваемые на двойниковых границах отдельными дислокациями. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

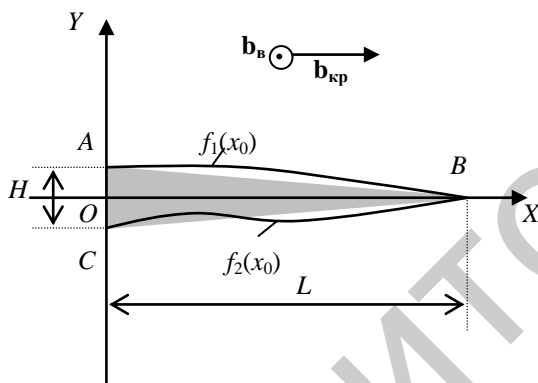


Рисунок 1 – Схематическое изображение клиновидного двойника и направления компонент вектора Бюргера двойникоующих дислокаций

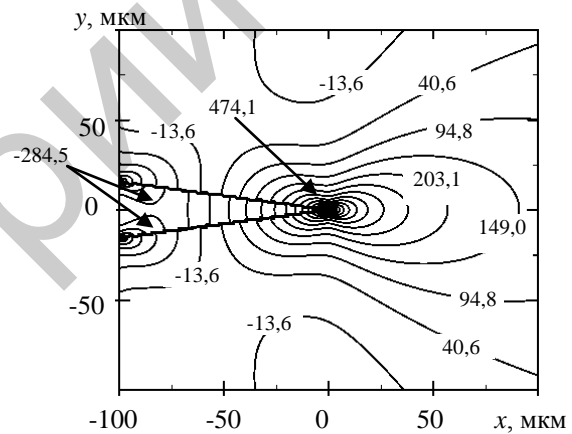


Рисунок 2 – Распределение приведенных сдвиговых напряжений у клиновидного двойника с прямолинейными границами при  $H = 31$  мкм

Криволинейные интегралы (1) и (2) сводятся к определенным интегралам типа

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} \rho_1(x_0) \sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y, x_0) dx_0;$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} \rho_2(x_0) \sigma_{ij}^{(2,0)}(x, y, x_0) dx_0.$$

Напряжения, создаваемые единичной двойнивающей дислокацией, находящейся на одной или другой двойниковой границе соответственно, при условии нахождения двойника вдали от поверхности, могут быть определены из соотношений:

$$\sigma_{xx}^{(1,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_1(x_0))[3(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{yy}^{(1,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_1(x_0))[(x - x_0)^2 - (y - f_1(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{xy}^{(1,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x - x_0)[(x - x_0)^2 - (y - f_1(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{zz}^{(1,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{кр}} \nu}{\pi(1-\nu)} \frac{y - f_1(x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2},$$

$$\sigma_{zx}^{(1,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{y - f_1(x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2},$$

$$\sigma_{zy}^{(1,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - f_1(x_0))^2};$$

$$\sigma_{xx}^{(2,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(x_0))[3(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{yy}^{(2,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(y - f_2(x_0))[(x - x_0)^2 - (y - f_2(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{xy}^{(2,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_{\text{кр}}}{2\pi(1-\nu)} \frac{(x - x_0)[(x - x_0)^2 - (y - f_2(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2]^2},$$

$$\sigma_{zz}^{(2,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{кр}} \nu}{\pi(1-\nu)} \frac{y - f_2(x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2},$$

$$\sigma_{zx}^{(2,0)}(x, y, x_0) = -\frac{\mu b_{\text{в}}}{2\pi} \frac{y - f_2(x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2},$$

$$\sigma_{zy}^{(2,0)}(x, y, x_0) = \frac{\mu b_V}{2\pi} \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - f_2(x_0))^2}.$$

Аналогичным способом может быть рассчитаны и напряжения у наблюдаемых на эксперименте двойников с выпуклыми или вогнутыми границами, а также двойников с произвольной формой границ.

В ходе реализации разработанной модели установлено, что напряжения и деформации локализованы на двойниковых границах. Нормальные напряжения  $\sigma_{xx}$  положительны у одной границы двойника и отрицательны у другой. Максимальные значения  $\sigma_{xx}$  принимают на границах двойника, причем в большей степени в средней их части, чем у вершины двойника. Сдвиговые напряжения  $\sigma_{xy}$  знакопеременны по отношению к оси, проходящей через середину двойника. У вершины двойника данные напряжения положительны, а у устья – отрицательны. В средней части двойника напряжения  $\sigma_{xy}$  минимальны. Нормальные напряжения  $\sigma_{yy}$  знакопеременны не только у вершины клиновидного двойника, но и у его устья. Напряжения  $\sigma_{zz}$  и  $\sigma_{zx}$  имеют одинаковую конфигурацию и отличаются лишь по величине. Данные напряжения знакопеременны относительно направления развития двойника. Напряжения  $\sigma_{zy}$  меняют знак, как и напряжения  $\sigma_{xy}$ , однако у напряжений  $\sigma_{zy}$  несколько различна конфигурация по сравнению с напряжениями  $\sigma_{xy}$ . Линии равных смещений не локализуются на двойниковых границах, а искривляются ими.

Впервые на основании дислокационной макроскопической модели рассчитаны напряжения внутри клиновидного двойника. Показано, что при прямолинейных границах двойника напряжения  $\sigma_{xy}$  внутри него распределены неравномерно, но симметрично по отношению к направлению развития двойника.

Равновесная форма клиновидного двойника обеспечивается балансом сил, действующих на вершинную двойникующую дислокацию. На основании условия равновесия для двойника клиновидной формы в рамках макроскопической дислокационной модели показано, что на выпуклой двойниковой границе плотность двойникующих дислокаций выше, а на вогнутой – ниже, чем на прямолинейной границе. Это находится в полном соответствии с экспериментальными данными. В случае двойника, находящегося у поверхности кристалла, с использованием условия равновесия получено, что для зарождения двойника равновесной формы необходимо наличие постоянно действующих внешних сил.

В диссертации впервые решена задача механики деформируемого твердого тела по расчету напряжений в упругом полупространстве, деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой при наличии клиновидного двойника. Показано, что напряжения в области локального поверхностного деформирования при наличии двойника существенно отличаются от напряжений

при отсутствии двойникования (рисунки 3–6). На конфигурацию данных напряжений существенное влияние оказывают напряжения, обусловленные двойником. Однако внешними нагрузками можно управлять местом расположения локализации напряжений в приповерхностной области.

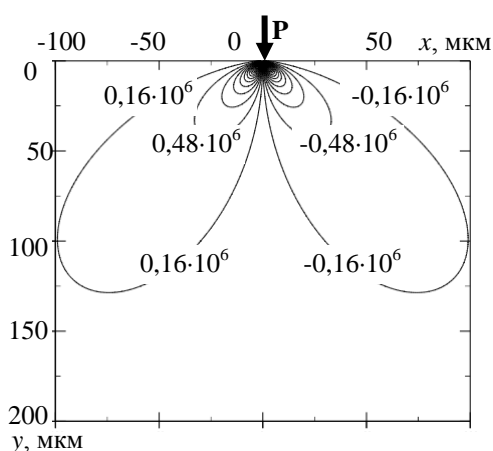


Рисунок 3 – Распределение напряжений  $\sigma_{xy}$  в упругом изотропном полупространстве при действии на поверхности в точке  $O$  сосредоточенной нормальной силы  $P$  величиной 100 Н

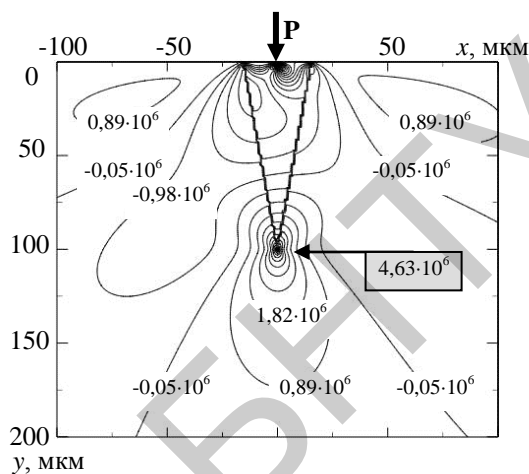


Рисунок 4 – Распределение напряжений  $\sigma_{xy}$  у клиновидного двойника при действующей в точке  $O$  сосредоточенной нормальной силе  $P$

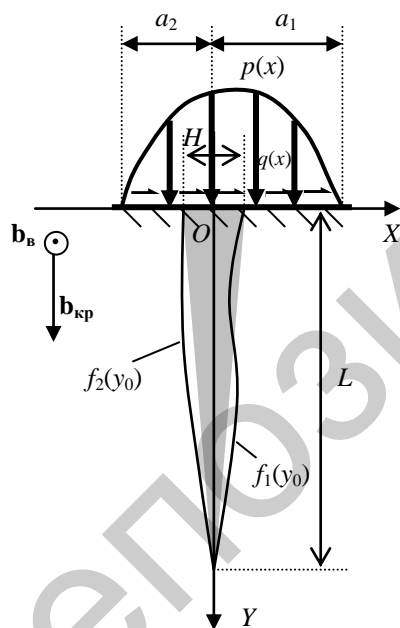


Рисунок 5 – Схематическое изображение клиновидного двойника, расположенного у поверхности кристалла, при действующей распределенной нагрузке

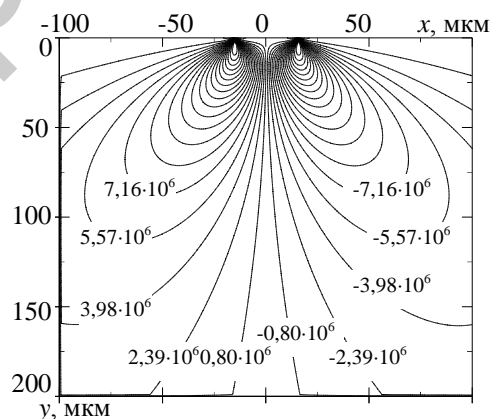


Рисунок 6 – Распределение напряжений  $\sigma_{xy}$  в упругом изотропном полупространстве при действии на поверхности распределенной нагрузки  $p(s)$  величиной 100 Н/м

В главе 4 «Методика расчета внутренних напряжений у наноразмерных, линзовидных и полисинтетических двойников» разрабатываются дислокационные модели нанодвойников и полисинтетических двойников.

Схематическое изображение нанодвойника линзовидной формы с позиций мезоскопической дислокационной модели представлено на рисунке 7. Данное изображение позволило вывести математические формулы для расчета напряжений у нанодвойника.

Модель позволила рассматривать начальные стадии развития двойников, которые имеют важное значение в процессе двойникования. В диссертационной работе впервые у нанодвойника проведен расчет полей напряжений, определены области их локализации. Получены условия равновесия нанодвойника, на основании которых проведен расчет компонент неупругих сил сопротивления развития двойнику, обеспечивающих его равновесную форму. В качестве практического приложения проведен расчет распределения примесей у нанодвойника. Установлено, что легирующий компонент локализуется у границ нанодвойника и у его вершин, что дало основание предложить теоретические основы способа формирования наноматериалов путем формирования наноразмерных фаз в нанодвойниках. Впервые в модели линзовидного двойника предложено использование метода электростатических аналогий. Это позволило решить трехмерную задачу по расчету полей напряжений у двойника линзовидной формы.

Проведен расчет полей напряжений у нанодвойника линзовидной формы при наличии внутри него точечного источника расширения. Этот расчет имеет важное практическое значение, так как позволяет рассматривать условия, в которых происходит зарождение двойников. Установлено, что при наличии точечного источника расширения напряжения внутри двойника положительные, напряжения у его вершин несколько уменьшаются, а отрицательные – увеличиваются. Это указывает на то, что процесс зарождения двойника происходит в условиях, когда генерация двойникоующих дислокаций и развитие двойника происходят при разном знаке напряжений.

Источниками двойникоующих дислокаций часто выступают полные дислокации, расщепляющиеся на частичные двойникоующие дислокации. Поэтому важное значение имеет проведенный расчет полей напряжений у двойникового зародыша, внутри которого находится полная дислокация. Результат этого расчета представлен на рисунке 8.

Проведена классификация полисинтетических двойников и разработаны их мезоскопическая и макроскопическая модели. Получены математические соотношения для расчета полей напряжений у полисинтетического двойника. Установлена периодичность в распределении напряжений у полисинтетического двойника. Показана возможность расчета полей напряжений на основании разработанных моделей у полисинтетических двойников различных групп. Изучена роль поверхности в формировании напряженного состояния у полисинтетического двойника на основании соответствующей методики расчета. Поверхность способствует локализации у нее напряжений и увеличению их уровня внутри полисинтетического двойника.

На основании расчета распределения примесей у полисинтетического двойника предложен способ синтеза слоистых материалов, в котором использу-

ется периодичность в распределении легирующего компонента в полисинтетическом двойнике.

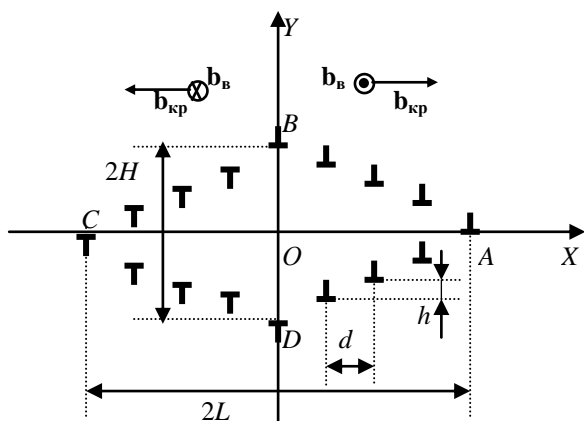


Рисунок 7 – Дислокационная модель нанодвойника

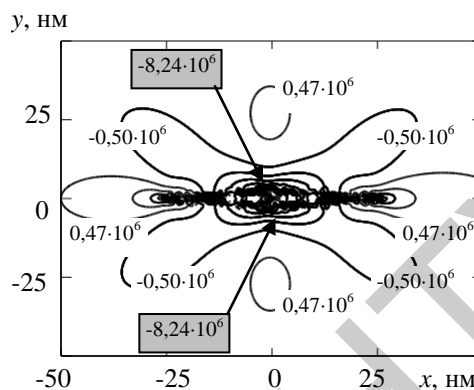


Рисунок 8 – Распределение сдвиговых напряжений  $\sigma_{xy}$  у нанодвойника при наличии в точке  $O$  полной краевой дислокации с величиной вектора Бюргера  $b = 0,348$  нм

Впервые решена задача механики деформируемого твердого тела по расчету напряжений в упругом полупространстве, деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой, с учетом напряжений, создаваемых полисинтетическим двойником. При этом для случая распределенной нагрузки использовалось схематическое представление расположения двойника, нагрузки и поверхности, показанное на рисунке 9.

Показано, что с помощью внешней нагрузки можно целенаправленно регулировать уровень и место локализации напряжений в полисинтетическом двойнике. Пример расчета напряжений у полисинтетического двойника, находящегося у поверхности, на которую действует распределенная нормальная нагрузка, представлен на рисунке 10. При этом для расчета напряжений у полисинтетического двойника использовалась суперпозиция соотношений:

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \sum_{n=0}^N \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} \rho_1(x_0) \sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y - nD, x_0) dx_0 ;$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \sum_{n=0}^N \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(x_0))^2} \rho_2(x_0) \sigma_{ij}^{(2,0)}(x, y - nD, y_0) dx_0 ,$$

где  $N$  – число двойников, входящих в состав полисинтетического двойника.

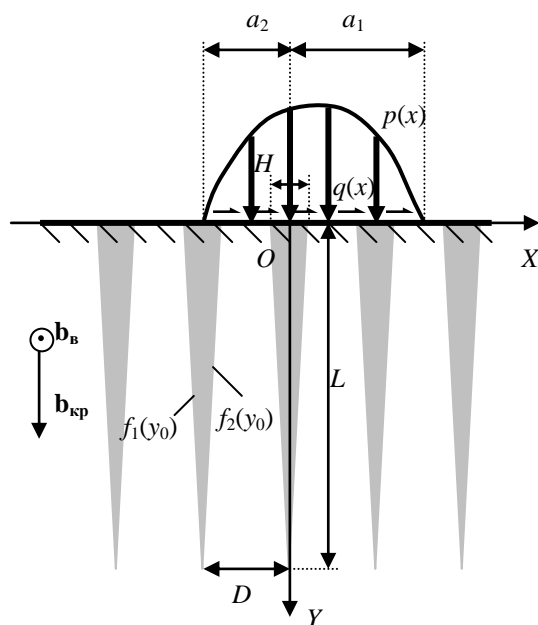


Рисунок 9 – Схематическое изображение полисинтетического двойника, находящегося у поверхности упругого полупространства, деформируемой распределенной нагрузкой

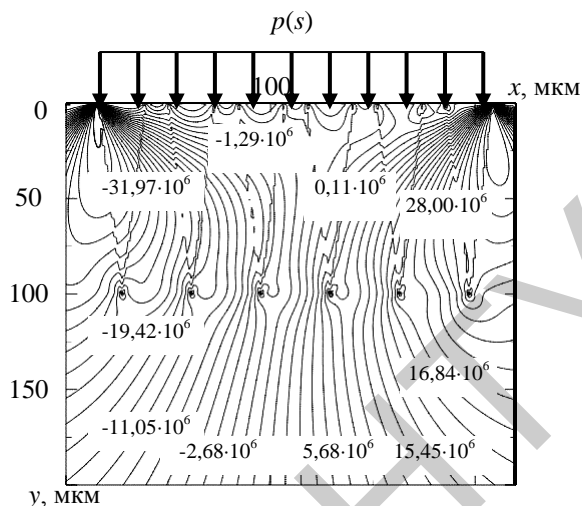


Рисунок 10 – Распределение напряжений  $\sigma_{xy}$  у полисинтетического двойника, находящегося у поверхности при наличии у поверхности распределенной нормальной нагрузки  $p(s) = 100 \text{ Н/м}$  ( $q(s) = 0$ ), действующей на полосе, длина которой равна ширине полисинтетического двойника

В главе 5 «Использование квазидислокационного подхода в моделировании негетогенной пластической деформации изотропных твердых тел» методом локального дозированного деформирования поверхности исследовалась негетогенная пластическая деформация аморфных многокомпонентных сплавов на основе железа. Выявлено два типа полос сдвига, возникающих у отпечатка пирамиды Вика: в виде лучей и полуколец, окаймляющих отпечаток индентора (рисунок 11). Отличительной особенностью в развитии полос сдвига типа полукольца является то, что их развитие не ограничено упорядоченностью структуры, как в случае монокристаллов, а происходит вдоль направления действия максимальных напряжений, в связи с чем, чешуйчатые навалы имеют округлую форму, а сдвиги в монокристаллах висмута формируют у индентора шестиугольник. Как двойникам, так и полосам сдвига в виде лучей свойственно ветвление и искривление, что свидетельствует об активном их взаимодействии с дефектами структуры деформируемого материала. Механизмы данного взаимодействия имеют схожесть, как в монокристаллах, так и в аморфных материалах. В результате выявленных аналогий в развитии негетогенной пластической деформации в аморфных материалах и сдвиговой пластической деформации в монокристаллах обоснована целесообразность в использовании дислокационного подхода в математическом и модельном физическо-механическом описании пластической деформации металлических стекол.

Разработаны квазидислокационные модели полос сдвига, основного канала негетогенной пластической деформации аморфных материалов: а) модель



чередующихся цепочек квазидислокаций; б) модель чередующихся квазидислокационных стенок; в) модель, основанная на подходе Билби-Коттрелла-Свиндена и г) макроскопическая квазидислокационная модель; обозначены области целесообразного применения каждой модели.

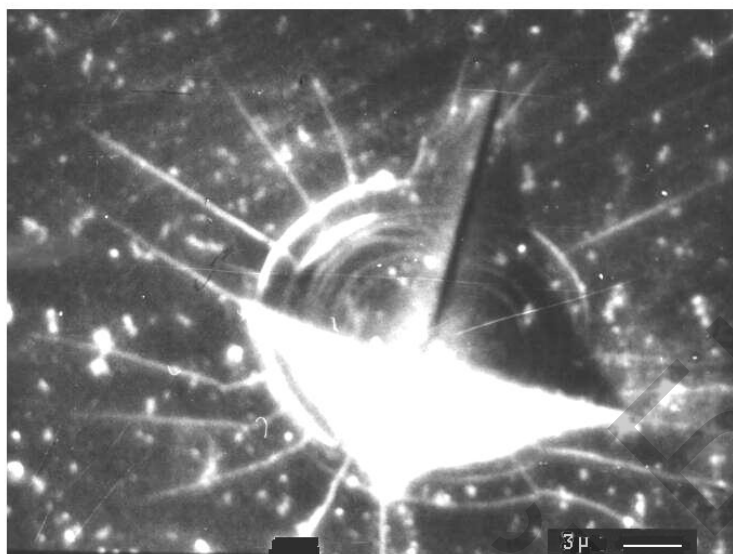


Рисунок 11 – Общий вид полос сдвига у отпечатка пирамиды Виккерса

Для расчета напряжений у полосы сдвига в рамках модели цепочек квазидислокаций в общем случае использовалось соотношение

$$\sigma_{ij} = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \sigma_{ij}(x + nd + m(l + Nd), y),$$

где  $M = L_{\text{пс}} / (L + l)$  (здесь  $L_{\text{пс}}$  – длина полосы сдвига;  $L$  – длина цепочки дислокаций;  $l$  – размер поры) – число пор;  $N = L/d$  (здесь  $d$  – расстояние между квазидислокациями в скоплении) – число квазидислокаций в скоплении;  $m$  и  $n$  – индексы суммирования.

Аналогичные соотношения использовались в модели квазидислокационных стенок и в модели, использующей подход Билби-Коттрелла-Свиндена.

В макроскопической квазидислокационной модели полосы сдвига в аморфном материале предполагалось непрерывное распределение квазидислокаций вдоль полосы сдвига с плотностью, подчиняющейся гармоническому закону:

$$\rho(x_0) = \frac{\rho_0}{2} \left( \cos \left( \frac{2\pi x_0}{l_0} \right) + 1 \right),$$

где  $\rho_0$  – максимальная плотность квазидислокаций;  $l_0$  – период;  $x_0$  – параметр интегрирования. Схема модели представлена на рисунке 12.

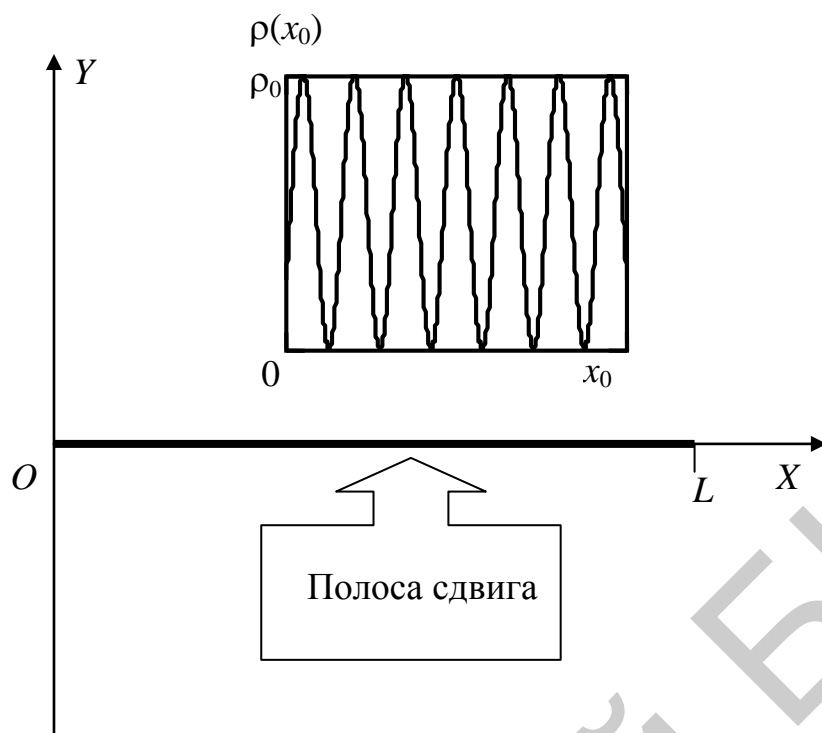


Рисунок 12 – След полосы сдвига в плоскости  $XOY$ .  
Схематическое изображение функции плотности распределения квазидислокаций вдоль полосы сдвига

В результате напряжения у полосы сдвига в рамках макроскопической квазидислокационной модели могут быть рассчитаны по формуле

$$\sigma_{ij}(x, y) = \int_0^L \sigma_{ij}^0(x, y, x_0) \rho(x_0) dx_0,$$

где  $\sigma_{ij}^0(x, y, x_0)$  – компоненты тензора напряжений, создаваемых единичной квазидислокацией.

На основании квазидислокационных моделей рассчитаны поля напряжений у полос сдвига и установлено, что область локализации напряжений находится не только у полосы сдвига, но и в определенном удалении от нее. Рассчитано распределение легирующего компонента у полос сдвига и установлено, что максимальная концентрация легирующего компонента находится в удалении от полосы сдвига на определенном расстоянии. Рассчитаны напряжения и распределение примесей у ветвящейся и полисинтетической полосы сдвига. С ростом температуры концентрация примесей в областях ее максимальной концентрации уменьшается.

Выполнен расчет коэффициентов интенсивности напряжений у полосы сдвига и у клиновидного двойника. Установлено, что величина коэффициента интенсивности напряжений у двойника в два раза выше, чем у полосы сдвига или трещины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана дислокационная мезоскопическая модель клиновидного двойника, в которой при расчетах напряжений и деформаций решена проблема учета винтовой и краевой составляющих вектора Бюргерса частичных двойнивающих дислокаций. Получены математические формулы для расчета полей напряжений, деформаций и смещений у клиновидного нано- или микродвойника. Формулы позволяют вести расчет на таком масштабном уровне, когда не пренебрегается расстоянием между двойнивающими дислокациями. На мезоскопическом уровне исследована конфигурация полей напряжений, смещений и деформаций у клиновидного двойника и установлена их связь с его геометрическими параметрами. Это позволило определить места локализации напряжений у клиновидного двойника и дало возможность предложить способ прогнозирования областей зарождения разрушения двойниющихся материалов [2, 4, 5, 7, 9, 35, 62, 72, 73, 75, 76, 84, 91].

2. Получены удобные для физико-механического анализа математические соотношения для расчета напряжений у вершины двойника клиновидной формы, где высока вероятность зарождения трещин. Дана количественная оценка эволюции напряжений и деформаций у вершины двойника с учетом роста числа двойнивающих дислокаций на двойниковых границах. Установлен нелинейный характер зависимости величины напряжений и деформаций от числа двойнивающих дислокаций на двойниковых границах. При этом скорость роста напряжений и деформаций с увеличением числа двойнивающих дислокаций уменьшается, что связано с увеличением длины двойника и характером перераспределения у него напряжений и деформаций. [2, 22, 52, 74].

3. Использование мезоскопической дислокационной модели позволило получить математические выражения для расчета полной энергии клиновидного двойника и установить ее связь с геометрическими параметрами двойника. Это дало возможность сравнить полученные результаты с экспериментальными данными и показать хорошее согласование теории и эксперимента. Расчет энергии выполнен на основе суперпозиции упругой энергии, энергии взаимодействия между двойнивающими дислокациями и энергии дефектов упаковки. Установлено, что на этапе зарождения двойника весомый энергетический вклад вносят упругая энергия и энергия дефектов упаковки, а дальнейшее развитие двойника преимущественно зависит от энергии взаимодействия двойнивающих дислокаций [2, 42, 47, 59, 89].

4. Из анализа баланса сил, действующих на вершинную двойнивающую дислокацию со стороны двойнивающих дислокаций двойниковых границ и сил неупругой природы, получено условие равновесия клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений, которое позволило установить взаимосвязь между равновесными параметрами двойника и силами неупругой природы и дать количественную оценку влияния этих сил на равновесную длину двойни-

ков. Установлено, что в двойникующихся материалах, в которых на двойникующие дислокации действует большая по величине сила неупругой природы возможно формирование равновесных двойников большей длины [2, 43, 61, 71].

5. Разработана мезоскопическая дислокационная модель динамического двойника, в которой учтен процесс генерирования двойникующих дислокаций. Показано, что в этом случае фронт высокого уровня напряжений не только увлекается за движущейся вершиной двойника, как это полагалось ранее, но сохраняет высокий уровень и у устья двойника [2, 90].

6. Разработана макроскопическая дислокационная модель клиновидного двойника, использующая приближение непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, которая отличается от существующих моделей тем, что не прибегает к приближению тонкого двойника, когда две его границы сливаются в одну. Это позволило рассматривать значительно более широкий класс двойников, для которых неприменимо приближение тонкого двойника, и которые значительно чаще встречаются на практике в деформируемых твердых телах [2, 33, 57].

7. Впервые в рамках макроскопической дислокационной модели рассчитаны напряжения внутри клиновидного двойника. Показано, что основными факторами, влияющими на конфигурацию полей напряжений у клиновидного двойника, являются форма двойниковых границ, плотность распределения на них двойникующих дислокаций, наличие поверхности. Выведены математические соотношения, позволившие рассчитать поля напряжений у клиновидного двойника с вогнутой и выпуклой двойниковой границей. Увеличение или уменьшение плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах приводит к потере симметрии в конфигурации полей напряжений у клиновидного двойника. Получены соотношения для расчета полей напряжений у клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла. При этом не использовалось приближение тонкого двойника. На основании условия равновесия для двойника клиновидной формы показано, что на выпуклой двойниковой границе плотность двойникующих дислокаций выше, а на вогнутой – ниже, чем на прямолинейной границе. Это находится в полном соответствии с экспериментальными данными. Показано, что напряжения в области внешнего деформирования при наличии двойника существенно отличаются от напряжений при отсутствии двойникования. На конфигурацию данных напряжений существенное влияние оказывают напряжения, обусловленные двойником. Однако внешними нагрузками можно управлять местом расположения локализации напряжений в приповерхностной области. Это указывает на то, что в механике применяемых в машиностроении двойникующихся материалов таких, как кремнистое железо, латуни, бронзы, титан и сплавы на его основе, бериллий, кадмий, цинк, олово, сурьма и др., для повышения качества прогнозирования их эксплуатационных характеристик, необходимо учитывать процесс двойникования. На основании макроскопической дислокационной модели проведен расчет распределения примесей у двойника клиновидной формы и определены потоки ее миграции. Установлено, что примесь движется по окружностям с

центрами в вершине и устье двойника замыкающимся в средней его части [2, 49, 50, 55, 58, 60, 83].

8. Разработана дислокационная мезоскопическая модель нанодвойника линзовидной формы. Это позволило рассматривать начальные стадии развития двойников. На основании модели выполнен расчет полей напряжений и распределения примесей у нанодвойника, определены области их локализации. Установлено, что положительные сдвиговые напряжения локализованы у вершин нанодвойника и средней его части, а отрицательные в остальных областях и внутри нанодвойника. Получены условия равновесия нанодвойника, на основании которых проведен расчет сил сопротивления развития двойнику, обеспечивающих его равновесную форму. Показано, что силы неупругой природы максимальны на начальных стадиях развития нанодвойника и меняют свой знак при дальнейшем росте двойника. Проведен расчет полей напряжений у нанодвойника линзовидной формы при наличии внутри его точечного источника расширения. Установлено, что точечный источник напряжений формирует внутри двойника положительные напряжения. У вершины такого двойника положительные напряжения несколько уменьшаются, а отрицательные – увеличиваются. В модели линзовидного двойника впервые предложено использовать принцип электростатических аналогий, что позволило перейти к решению трехмерной задачи [2, 37, 48, 51, 63, 86].

9. На основе анализа экспериментальных данных проведена классификация полисинтетических двойников и разработаны их дислокационные модели. Показана возможность расчета полей напряжений и распределения примесей на основании разработанных моделей у полисинтетических двойников различных групп. Установлена роль поверхности в формировании напряженного состояния у полисинтетического двойника. Показано, что поверхность способствует локализации у нее напряжений и увеличению их уровня внутри полисинтетического двойника. Решена задача механики деформируемого твердого тела по расчету напряжений в упругом полупространстве, деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой, с учетом напряжений, создаваемых полисинтетическим двойником. Показано, что с помощью внешней нагрузки можно целенаправленно регулировать уровень и место локализации напряжений в полисинтетическом двойнике [2, 3, 34, 36, 38, 40, 54, 56, 85].

10. В ходе экспериментальных исследований выявлены аналогии между негомогенной пластической деформацией металлических стекол со сдвиговой пластической деформацией монокристаллов. Это дало основание для использования дислокационного подхода в математическом описании пластической деформации аморфных сплавов и для разработки квазидислокационных моделей полос сдвига, являющихся основным каналом негомогенной пластической деформации аморфных материалов. Разработаны следующие модели: модель чередующихся цепочек квазидислокаций; модель чередующихся квазидислокационных стенок; модель, основанная на подходе Билби-Коттрелла-Свиндена и макроскопическая квазидислокационная модель. Определены области целесообразного применения каждой модели. Установлено, что в деформируемом

аморфном материале напряжения локализируются у полос сдвига, активируя в этих областях процесс разрушения. Поэтому для повышения качества прогнозирования эксплуатационного ресурса металлических стекол важно учитывать их склонность к неомогенной пластичности. Результаты получили практическую реализацию в сфере науки и образования [1, 6, 8, 10–21, 23–32, 39, 41, 44–46, 53, 64–70, 77–88, 92].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Явление преждевременного разрушения материала под действием циклически изменяющихся нагрузок получило в технике название усталости материалов, а способность материала противостоять действию переменных нагрузок называется выносливостью. Общепринято считать, что до 80 % всех поломок деталей машин происходит по вине усталости материалов.

Существует много гипотез, объясняющих причины возникновения усталостных трещин. Применительно к наиболее распространенным в машиностроении материалам – металлам можно считать, что в основе этого явления лежит неоднородность строения вещества. Эта неоднородность может иметь внутрикристаллический характер и вызываться нарушениями правильной атомной решетки в кристаллах (такие нарушения называются дислокациями и на их основе создается дислокационная теория усталости металлов), либо она может быть межкристаллической, вызываться наличием пустот, примесей, включений, неправильной формой кристаллов и т. д. Оба вида неоднородностей в строении металлов служат источниками возникновения сильной концентрации напряжений в микрообъемах вещества. Поэтому даже при небольших средних напряжениях по сечению детали в отдельных частицах материала под действием переменных нагрузок возникают сначала остаточные деформации, затем микротрещины, которые быстро увеличиваются и, уменьшая рабочее сечение детали, приводят к ее поломке. Границы двойников являются концентраторами больших внутренних напряжений, способствующими появлению трещин. Поэтому разработанные методы расчета внутренних напряжений у двойников могут быть использованы для прогнозирования областей зарождения трещин в двойникующихся материалах, к которым относятся практически все используемые в машиностроении металлы.

Существующая в настоящее время теория тонкого двойника, в которой предполагается, что расстояние между границами двойника пренебрежимо мало, не позволяет рассматривать напряженное состояние и физические процессы внутри двойника и в непосредственной близости к нему. Выводы такой теории справедливы лишь для областей материала, значительно удаленных от двойника. Развитие в данной работе математического аппарата, основанного на методе функций Грина применительно к расчету полей напряжений у двойника, позволило решить эту проблему. Более того, появилась возможность теоретического исследования физико-механических процессов не только внутри двойника и в приближенных к нему областях, но и учитывать особенности формы границ

двойника и характер распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах. Это позволило сделать теорию двойникования цельной и устранить недостатки существующей дислокационной теории двойникования кристаллов, значительно расширяя область ее практического применения в расчетах по оценке прочности конструкций из двойникующих материалов.

Задачи механики деформируемых твердых тел в настоящее время решаются без учета локализации напряжений на двумерных дефектах кристаллической решетки, которые активно зарождаются в очагах деформации. Это приводит к ошибкам, которые недопустимы в случае прогнозирования поведения технических систем и конструкций, требующих при их эксплуатации высокой степени надежности, так как локализованные на двумерных дефектах напряжения способствуют зарождению приводящих к разрушению микротрещин. Поэтому рекомендуется использовать результаты данной работы в машиностроении, где широко используются двойникующиеся материалы такие, как стали различных марок, кремнистое железо, титан и сплавы на его основе, бронзы, латуни и т. д.

Полученные результаты по расчету распределения примесей в полисинтетическом двойнике под действием напряжений этого двойника показали, что у двойниковых границ из-за миграции к ним примесных атомов создаются благоприятные условия для зарождения новых фаз, распределение которых носит периодический характер, зависящий от расположения двойников, входящих в состав полисинтетического двойника. Это дает теоретическую основу для разработки способа, а в дальнейшем и технологии, синтеза слоистых материалов без использования дорогостоящего вакуумного оборудования. Данное направление имеет важное практическое значение в области информационных технологий и создании полупроводниковых лазеров.

Возросший интерес к изучению свойств находящихся все более широкое практическое применение материалов с памятью формы в настоящее время значительно увеличил актуальность исследований двойникования, так как уникальные свойства данных материалов полностью определяются поведением границ раздела родственных двойниковым границам. Поэтому полученные в работе результаты могут быть использованы в технологии материалов с памятью формы.

В настоящее время все более весомую роль в технических системах нового поколения играют наноматериалы. В выполненной работе впервые предложены модели нанодвойникования для целенаправленного, управляемого с помощью напряжений нанодвойника распределения нанофаз в двойникующемся материале. Практическая реализация данного направления на современном этапе развития науки и техники является весьма актуальной.

Металлические стекла и аморфные материалы с наноразмерными включениями в настоящее время находят все более широкое практическое применение. Механические свойства этих материалов играют не маловажную роль в расширении областей их практического применения. Поэтому изучение особенностей пластической деформации и разработка математических методов

прогнозирования поведения данных материалов при их деформировании выходит на передний план. Полученные в этом направлении результаты могут быть использованы при создании нанороботов и технических систем нового поколения, использующих новые материалы с еще недостаточно хорошо изученными уникальными свойствами.

Широкое применение результаты работы найдут в сфере образования для изучения процессов пластической деформации двойникующихся и аморфных материалов. При этом они могут быть использованы не только в спецкурсах для студентов, но и магистрантов, аспирантов. В этом направлении результаты уже нашли применение, на что получены акты внедрений в следующих учреждениях образования: УО «Белорусский государственный университет транспорта», Белорусский национальный технический университет, УО «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины». Результаты работы нашли практическое использование и в сфере научных исследований не только в Республике Беларусь (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого» НАН Беларуси, ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси, ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси), но и за рубежом (научно-исследовательское подразделение «AdaptaMat» Финляндия, Хельсинки). Практическое использование в производстве (ОАО «Белшина») получили результаты исследования пластической деформации быстрозакаленных сплавов на основе железа.

Практическая значимость результатов обусловлена моделированием реального напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и сооружений, находящихся под действием заданной внешней нагрузки, материал которых подвержен двойникованию или негомогенной пластичности. Это дает возможность достоверного прогнозирования прочностных и деформационных характеристик ответственных деталей конструктивных изделий. Новизна результатов подтверждена патентами [91, 92].



# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## *Монографии*

1. Верещагин, М.Н. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа : монография / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков. – Гомель : Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2004. – 134 с.
2. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел : монография / О.М. Остриков. – Гомель : Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2008. – 301 с.

## *Статьи в научных журналах*

3. Остриков, О.М. О возможности формирования фазовых дифракционных решеток на основе явления двойникования монокристаллов / О.М. Остриков // Письма в журнал технической физики. – 2000. – Т. 26, № 21. – С. 49–52.
4. Остриков, О.М. Влияние скорости нагружения на механизм пластической деформации в висмуте / О.М. Остриков, С.Н. Дуб // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 5. – С. 44–46.
5. Остриков, О.М. Нанодвойникование монокристаллов висмута / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 51–52.
6. Особенности пластической деформации при индентировании пирамидой Виккерса поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Физика металлов и металловедение. – 2002. – Т. 93, № 5. – С. 101–104.
7. Остриков, О.М. Напряженное состояние у клиновидного двойника при дисбалансе плотностей двойникующих дислокаций / О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 4. – С. 180–182.
8. Исследование методом локального деформирования особенностей пластической деформации аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Кристаллография. – 2002. – Т. 47, № 4. – С. 691–696.
9. Остриков, О.М. Исследование механического двойникования монокристаллов сурьмы методом наноиндентирования / О.М. Остриков, С.Н. Дуб // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 1. – С. 170–172.
10. Верещагин, М.Н. Моделирование напряженного состояния у полосы сдвига в аморфном материале / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 3. – С. 113–115.

11. Верещагин, М.Н. Дислокационная модель полисинтетических полос сдвига в аморфных материалах / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 3. – С. 164–168.
12. Верещагин, М.Н. Ветвление полос сдвига аморфных материалов / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 11–20.
13. Влияние изохронного отжига на интенсивность развития полос сдвига в аморфных сплавах на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 4. – С. 107–109.
14. Особенности пластической деформации аморфного сплава на основе железа с полипараксилиленовым покрытием / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков, Н.П. Глазырин // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2003. – № 2. – С. 7–11.
15. Верещагин, М.Н. Особенности форм полос сдвига, возникающих у концентратора напряжений на поверхности аморфного сплава / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Металлы. – 2003. – № 4. – С. 114–117.
16. Влияние изохронного и изотермического отжигов на структуру и микротвердость быстрозакаленного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2003. – № 2. – С. 52–54.
17. Влияние изохронного отжига на зарождение полос сдвига вблизи концентратора напряжений на поверхности аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 97–101.
18. Верещагин, М.Н. Использование модели чередующихся дислокационных стенок для моделирования напряженного состояния у полос сдвига в аморфных материалах / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2003. – № 4. – С. 36–40.
19. Изучение закономерностей развития полос сдвига при наноиндентировании аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, С.Н. Дуб, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45, № 3. – С. 172–175.
20. Развитие сдвиговой пластической деформации в аморфных сплавах в процессе изохронного отжига / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – № 2. – С. 23–26.
21. Верещагин, М.Н. Анизотропия пластической деформации аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2004. – № 1. – С. 53–56.
22. Остриков, О.М. Напряженное состояние у вершины клиновидного двойника / О.М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2004. – № 2. – С. 104–113.

23. Верещагин, М.Н. Неоднородность пластической деформации аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Письма в журнал технической физики. – 2004. – Т. 30, № 5. – С. 82–87.

24. Верещагин, М.Н. Влияние термической обработки на негетогенную пластическую деформацию прокатанных аморфных лент сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, № 4. – С. 31–35.

25. Влияние термической обработки на механические свойства аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова, Д.Б. Зюков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2004. – № 5. – С. 55–58.

26. Верещагин, М.Н. Влияние иницированных высокоэнергетической обработкой фазовых превращений на электрические, механические свойства и негетогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, В.Г. Шепелевич // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2004. – № 1. – С. 3–11.

27. Верещагин, М.Н. Дислокационная модель полос сдвига в аморфных материалах / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2004. – № 4. – С. 98–105.

28. Влияние отжига на характер разрушения при испытаниях на разрыв аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.В. Шилько, С.Н. Цыбранкова // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 4. – С. 13–15.

29. Верещагин, М.Н. Влияние прокатки на особенности развития пластической деформации при локальном деформировании поверхности аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Физика и химия обработки материалов. – 2004. – № 3. – С. 46–49.

30. Влияние имплантации ионов  $N_2^+$  на негетогенную пластическую деформацию аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, Ф.Ф. Комаров, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Доклады НАН Беларусі. – 2005. – Т. 49, № 2. – С. 45–47.

31. Влияние изотермического отжига на формирование полос сдвига в аморфных сплавах на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 2. – С. 33–36.

32. Верещагин, М.Н. Квадриупольно-дисклинационная модель аморфного материала / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Доклады НАН Беларусі. – 2005. – Т. 49, № 5. – С. 46–48.

33. Остриков, О.М. Дислокационная макроскопическая модель клиновидного двойника / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 2. – С. 10–18.

34. Остриков, О.М. Классификация полисинтетических двойников / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 2. – С. 3–9.

35. Остриков, О.М. Использование полипараксилиленовых тонких пленок при исследовании пластической деформации монокристаллов висмута / О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 4. – С. 162–166.

36. Остриков, О.М. Дислокационная модель полисинтетического двойника / О.М. Остриков, Е.В. Корнеевец // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 42–50.

37. Остриков, О.М. Формирование наноразмерных фаз в нанодвойниках / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 3–7.

38. Остриков, О.М. Распределение легирующего компонента в полисинтетических двойниках и теоретический прогноз формирования слоистых материалов с использованием явления полисинтетического двойникования / О.М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2006. – Т. 11, № 3. – С. 54–56.

39. Остриков, О.М. Влияние лазерной обработки на микротвердость и неомогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 11. – С. 14–16.

40. Остриков, О.М. Дислокационная мезоскопическая модель полисинтетического двойника / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – № 2. – С. 11–21.

41. Остриков, О.М. Структура быстрозатвердевшего многокомпонентного сплава на основе железа системы Fe-Cr-Mo-V-Si-B / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 6. – С. 49–51.

42. Остриков, О.М. Расчет на основании мезоскопической дислокационной модели собственной энергии клиновидного двойника / О.М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 22–24.

43. Остриков, О.М. Условие равновесия наноразмерных зародышей двойников / О.М. Остриков // Вестник БНТУ. – 2007. – № 2. – С. 26–28.

44. Остриков, О.М. Некоторые механические свойства электролитически осажденных аморфных пленок сплавов Ni-W / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – № 3. – С. 54–58.

45. Остриков, О.М. Дислокационная гармоническая модель полосы сдвига в аморфном материале / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – № 4. – С. 41–48.

46. Остриков, О.М. Особенности напряженного состояния у полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 2. – С. 44–46.

47. Остриков, О.М. Расчет энергии нанодвойника клиновидной формы в рамках дислокационной мезоскопической модели / О.М. Остриков // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, № 2. – С. 58–62.

48. Остриков, О.М. Метод электростатических аналогий в модели линзовидного двойника / О.М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2008. – № 1. – С. 161–170.

49. Остриков, О.М. Влияние плотности двойникующих дислокаций на конфигурацию полей напряжений вблизи клиновидного двойника с различной формой границ / О.М. Остриков // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 5. – С. 199–204.

50. Остриков, О.М. Учет формы границ клиновидного двойника в его макроскопической дислокационной модели / О.М. Остриков // Физика металлов и металловедение. – 2008. – Т. 106, № 5. – С. 471–476.

51. Остриков, О.М. Дислокационная модель нанодвойника / О.М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2008. – № 5. – С. 124–129.

52. Остриков, О.М. Расчет деформаций у вершины клиновидного двойника на основании мезоскопической дислокационной модели / О.М. Остриков // Вестник Могилевского государственного университета. – 2008. – № 1(29). – С. 166–175.

53. Остриков, О.М. Влияние термической обработки на пластические характеристики аморфных сплавов на основе железа / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 35–36.

54. Остриков, О.М. Методика расчета на основании макроскопической дислокационной модели полей напряжений у полисинтетического двойника, находящегося вдали от поверхности двойникующегося материала / О.М. Остриков // Вестник БНТУ. – 2008. – № 5. – С. 68–70.

55. Остриков, О.М. Напряженное состояние у поверхности кристалла, деформируемой сосредоточенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника / О.М. Остриков // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, № 5. – С. 137–139.

56. Остриков, О.М. Расчет полей напряжений у полисинтетического двойника, находящегося у поверхности кристалла / О.М. Остриков // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82, № 1. – С. 184–190.

57. Остриков, О.М. Метод расчета распределения деформаций у клиновидного двойника с использованием подходов макроскопической дислокационной модели / О.М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2009. – № 4. – С. 52–58.

58. Остриков, О.М. Способ расчета полей напряжений у клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла, в приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – № 4. – С. 36–39.

59. Остриков, О.М. Расчет энергии взаимодействия двойникующих дислокаций клиновидного двойника, проведенный на основании мезоскопической дислокационной модели / О.М. Остриков // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82, № 6. – С. 1199–1203.

60. Остриков, О.М. Расчет распределения примеси и потоков ее миграции у клиновидного двойника на основании макроскопической дислокационной

модели / О.М. Остриков // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 4. – С. 62–65.

61. Остриков, О.М. Определение на основании мезоскопической дислокационной модели равновесных параметров клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений / О.М. Остриков // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 4. – С. 66–70.

62. Остриков, О.М. Поля деформаций у клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009. – № 4(39). – С. 25–31.

63. Остриков, О.М. Напряженное состояние у наноразмерного двойникового зародыша при наличии внутри него точечного источника расширения / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2010. – № 1(40) – С. 16–22.

### ***Статьи в сборниках материалов научных конференций***

64. Влияние изохронного и изотермического отжига на особенности пластической деформации при локальном нагружении поверхности аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, С.Н. Цыбранкова // Структура и свойства металлических и шлаковых расплавов : материалы X Российской научной конференции. – Екатеринбург – Челябинск : Изд-во Южноуральского государственного университета, 2001. – Т. 4. – С. 3–6.

65. Влияние прокатки и последующей термической обработки на негетогенную пластическую деформацию сложнолегированных аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков, А.М. Дубравин, О.Ю. Комков // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением : материалы Международной научно-технической конференции. – Минск: Технопринт, 2004. – Т. 1. – С. 26–31.

66. Верещагин, М.Н. Влияние лазерной обработки на микротвердость и негетогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением : материалы Международной научно-технической конференции. – Минск: Технопринт, 2004. – Т. 1. – С. 222–226.

67. Верещагин, М.Н. Расчет полей напряжений и распределения примесей в аморфном материале на основе квадрупольно-дисклинационной модели / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Структура и свойства металлических и шлаковых расплавов : материалы XI Российской научной конференции. – Екатеринбург – Челябинск : Изд-во Южноуральского государственного университета, 2004. – Т. 4. – С. 157–161.

68. Особенности пластической деформации аморфного сплава Fe-Cr-Mo-V-B-Si, имплантированного ионами азота / М.Н. Верещагин, Ф.Ф. Комаров, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Структура и свойства металлических и шлаковых расплавов : материалы XI Российской научной конференции. – Екатеринбург – Челябинск : Изд-во Южноуральского государственного университета, 2004. – Т. 4. – С. 69–72.

69. Верещагин, М.Н. Негомогенная пластическая деформация сложнолегированных аморфных сплавов в областях импульсного лазерного воздействия / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов : материалы XI Российской научной конференции. – Екатеринбург – Челябинск : Изд-во Южноуральского государственного университета, 2004. – Т. 4. – С. 161–165.

70. Остриков, О.М. Условие равновесия полосы сдвига в аморфном материале в ее макроскопической квазидислокационной модели / О.М. Остриков // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : материалы VI Международной научно-технической конференции. – Новополоцк, 2007. – Т. 1 – С. 121–124.

71. Остриков, О.М. Условие равновесия клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла, при непрерывном распределении двойникообразующих дислокаций на двойниковых границах при отсутствии внешних сил / О.М. Остриков // Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности : материалы IV научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М. : МАТИ, 2007. – С. 756–760.

72. Василевич, Ю.В. Теория двойникования деформируемых твердых тел / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Механика – 2009. Материалы IV Белорусского Конгресса по теоретической и прикладной механике. – Минск, 2009. – С. 78 – 82.

### ***Статьи в сборниках научных работ***

73. Василевич, Ю.В. Способ расчета полей смещений у клиновидного двойника / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Машиностроение. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 317–320.

74. Остриков, О.М. Анализ напряженного состояния у вершины клиновидного механического двойника / О.М. Остриков, Ю.В. Василевич // Машиностроение. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 320–324.

### ***Тезисы докладов***

75. Dub, S.N. The effect of loading rate on the mechanism of plastic deformation in bismuth studied by instrumented sharp indentations / S.N. Dub, O.M. Ostrikov // Symposium Z : Multiscale Materials Modeling / MRS Fall Meeting. – Boston, USA, 2000. – P. 54.

76. Дуб, С.Н. Влияние скорости нагружения на механизм пластической деформации в висмуте и сурьме во время испытаний на нанотвердость / С.Н. Дуб, О.М. Остриков // Актуальные проблемы прочности : материалы XXXVII Международного семинара. – Киев, 2001. – С. 36.

77. Macroscopic brittleness and local plasticity of amorphous alloys on iron base / M.N. Vereschagin, V.G. Shepelevich, S.V. Shilko, O.M. Ostrikov // Mechanics of Composite Materials. – Riga, Latvia, 2002. – P. 57.

78. Структура и особенности пластической деформации аморфных сплавов на основе железа с наноразмерными метастабильными включениями, полученными импульсным лазерным воздействием / М.Н. Верещагин, Ф.Ф. Комаров, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2003. – С. 26–27.

79. Остриков, О.М. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа / О.М. Остриков // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : материалы научной конференции / ИММС НАНБ. – Гомель, 2003. – С. 83–85.

80. Верещагин, М.Н. Влияние термомодеформационной обработки на негемогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Теория и технология процессов пластической деформации – 2004 : материалы Международной конференции / МГИСиС. – М., 2004. – С. 87.

81. Верещагин, М.Н. Влияние различных энергетических воздействий на гетерогенную пластичность аморфных сложнолегированных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков // Современные проблемы машиноведения : материалы V Международной научно-технической конференции / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2004. – С. 35–36.

82. Остриков, О.М. Модель дислокации в аморфном материале / О.М. Остриков // Современные проблемы машиноведения : материалы VI Международной конференции / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 58–59.

83. Остриков, О.М. Поток миграции примесей у клиновидного двойника / О.М. Остриков // Современные проблемы машиноведения : материалы VI Международной конференции / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 59–60.

84. Остриков, О.М. Расчет напряжений и вывод условия равновесия клиновидного нанодвойника, находящегося у поверхности ионно-имплантированного материала / О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2007. – С. 84–85.

85. Остриков, О.М. Обоснование возможности формирования слоистых материалов на основе явления полисинтетического механического двойникования, вызванного интенсивной деформацией / О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2007. – С. 88–89.

86. Остриков, О.М. Нанодвойникование, как эффективный способ формирования композитов с наноразмерными включениями / О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2007. – С. 89–90.

87. Остриков, О.М. Влияние высокоэнергетической обработки на негемогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами



нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2007. – С. 86–87.

88. Остриков, О.М. Квазидислокационная модель негомогенной пластической деформации аморфных материалов / О.М. Остриков // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий : материалы научной конференции / ИАТЭ. – Обнинск, 2007. – С. 91–92.

89. Остриков, О.М. Энергетика двойникования кристаллов, деформируемых сосредоточенной нагрузкой / О.М. Остриков // Современные проблемы машиноведения : материалы VII Международной научно-технической конференции / Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – С. 54–55.

90. Остриков, О.М. Мезоскопическая дислокационная динамическая модель клиновидного двойника / О.М. Остриков // Современные проблемы машиноведения: материалы VII Международной научно-технической конференции / Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – С. 55–56.

### *Патенты*

91. Способ определения интенсивности выкрашивания материалов : пат. Респ. Беларусь, МПК7 G01N 3/08 / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков, П.Н. Гракович, С.В. Шилько, Н.П. Глазырин ; заявитель ИММС НАН Беларуси. – № а20030020ВУ ; заявл. 10.01.03 ; опубл. 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2004. – № 3. – С. 61.

92. Способ определения микротвердости аморфных металлов : пат. Респ. Беларусь, G01N / П.Н. Гракович, Н.П. Глазырин, С.В. Паркалов, М.Н. Верещагин, О.М. Остриков ; заявитель ИММС НАН Беларуси. – № а20020778ВУ ; заявл. 23.09.02 ; опубл. 31.03.04 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2004. – № 1. – С. 63.

## РЭЗІЮМЭ

Вострыкаў Алег Міхайлавіч

### Напружаны стан цвёрдых дэфармаваных целаў, абумоўлены двайнікамі і палосамі зруху на стадыі назапашвання пашкодванняў

**Ключавыя словы:** палі напружанняў, зрушэнні, дэфармацыі, двайнікаванне, негамагенная пластычная дэфармацыя, полісінтэтычнае двайнікаванне, нанадвойнікаванне.

**Мэта працы:** развіццё дыслакацыйнай тэорыі двайнікавання і негамагеннай пластычнай дэфармацыі аморфных матэрыялаў і ўжыванне гэтых тэорый для рашэння задач механікі дэфармаванага цвёрдага цела, звязаных з вонкавымі засяроджанымі ці размеркаванымі на паверхні пругкай паўпрасторы нагрузкамі, а таксама ўнутранымі канцэнтратарамі напружанняў.

У дысертацыйнай працы выкарыстоўваліся эксперыментальныя і тэарэтычныя метады даследаванняў. Эксперыментальныя даследаванні ляглі ў аснову распрацоўваемых тэорый і выкарыстоўваліся для праверкі атрыманых на іх аснове вынікаў. Пры гэтым для вывучэння механізмаў дэфармавання цвёрдых целаў выкарыстоўвалася метадыка лакальнага дазаванага дэфармавання паверхні і аднавосевае расцяжэнне. Для тэставання структуры дэфармаваных матэрыялаў выкарыстоўваліся сучасныя метады даследаванняў таякія, як атамная сілавая мікраскапія, растрвая і прасвечваючая электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, мікрарэнтгенаспектральны аналіз. У тэарэтычных даследаваннях шырока выкарыстоўваўся метады суперпазіцыі напружанняў двайнікуючых дыслакацый, метады функцый Грына, метады электростатычных аналогій, камп'ютарнае мадэляванне.

Гэта дазволіла ўпершыню вырашыць задачы механікі дэфармаванага цвёрдага цела, звязаныя з разлікам напружанняў у дэфармаваным засяроджанай ці размеркаванай нагрузкай матэрыяле, які двайнікуецца або аморфны, і ўлічыць лакалізацыю напружанняў на межах двайнікоў і палос зруху, значна скажальную дэфармацыйную карціну, фармаваную вонкавымі нагрузкамі. Вынікі знайшлі практычную рэалізацыю ў сферы адукацыі і навукі і рэкамендуецца для выкарыстання ў прамысловасці з мэтай павышэння якасці прагназавання рэсурсу трываласці ўжывальных у машынабудаванні хутказагартаваных матэрыялаў і матэрыялаў, што двайнікуюцца.

## РЕЗЮМЕ

Остриков Олег Михайлович

### Напряженное состояние твердых деформируемых тел, обусловленное двойниками и полосами сдвига на стадии накопления повреждений

**Ключевые слова:** поля напряжений, смещения, деформации, двойникование, негомогенная пластическая деформация, полисинтетическое двойникование, нанодвойникование.

**Цель работы:** развитие дислокационной теории двойникования и негомогенной пластической деформации аморфных материалов и применение этих теорий для решения задач механики деформируемого твердого тела, связанных с внешними сосредоточенными или распределенными на поверхности упругого полупространства нагрузками, а также внутренними концентраторами напряжений.

В диссертационной работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследований. Экспериментальные исследования легли в основу разрабатываемых теорий и использовались для проверки полученных на их основе результатов. При этом для изучения механизмов деформирования твердых тел использовалась методика локального дозированного деформирования поверхности и одноосное растяжение. Для тестирования структуры деформируемых материалов использовались современные методы исследований такие, как атомная силовая микроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, микрорентгеноспектральный анализ. В теоретических исследованиях широко использовался метод суперпозиции напряжений двойникующих дислокаций, метод функций Грина, метод электростатических аналогий, компьютерное моделирование.

Это позволило впервые решить задачи механики деформируемого твердого тела, связанные с расчетом напряжений в деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой двойникующемся или аморфном материале и учесть локализацию напряжений на границах двойников и полос сдвига, существенно искажающую деформационную картину, формируемую внешними нагрузками. Результаты нашли практическую реализацию в сфере образования и науки и рекомендуются для использования в промышленности с целью повышения качества прогнозирования ресурса прочности применяемых в машиностроении двойникующихся и быстрозакаленных материалов.

## SUMMARY

**Ostrikov Oleg Mihajlovich**

### **The tension of firm deformable bodies caused by doubles and strips of shift at a stage of accumulation damages**

**Keywords:** fields of pressure, displacement, deformations, twin, not homogeneous plastic deformation, polysynthetic twin, nanotwin

**The work purpose:** development дислокационной theories twining and not homogeneous plastic deformation of amorphous materials and application of these theories for the decision of problems of mechanics of the deformable firm body, connected with external concentrated or distributed on a surface of elastic semispace loadings, and also internal concentrators of pressure.

In dissertational work experimental and theoretical methods of researches were used. Experimental researches have laid down in a basis of developed theories and were used for check of the results received on their basis. Thus for studying of mechanisms of deformation of firm bodies the technique of the local dosed out deformation of a surface and одноосное a stretching was used. For testing of structure of deformable materials modern methods of researches such, as nuclear power microscopy, raster and appearing through electronic microscopy, рентгеноструктурный the analysis, микрорентгеноспектральный the analysis were used. In theoretical researches the method of superposition of pressure twining dispositions, a method of functions of Green, a method of electrostatic analogies, computer modeling was widely used.

It has allowed to solve for the first time problems of mechanics of the deformable firm body, connected with calculation of pressure in deformed by the concentrated either distributed loading twining or an amorphous material and to consider localization of pressure on borders of doubles and the shift strips, essentially deforming deformation picture formed by external loadings. Results have found practical realization in an education sphere and sciences, and are recommended for use in the industry for the purpose of improvement of quality of forecasting of a resource of durability applied in mechanical engineering twining and quickly tempered materials.

Научное издание

**ОСТРИКОВ Олег Михайлович**

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЕРДЫХ  
ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ  
ДВОЙНИКАМИ И ПОЛОСАМИ СДВИГА  
НА СТАДИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

---

Подписано в печать 17.05.2011.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,50. Уч.-изд. л. 1,95. Тираж 60. Заказ 477.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.  
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.

Репозиторий БНТУ