

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

*УДК 539.21*

**ОСТРИКОВ**  
**Олег Михайлович**

**ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ  
В ЗОНАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ  
ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ  
НАГРУЗОК**

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

Минск, 2014

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 «Сопrotивление материалов  
машиностроительного профиля» Белорусского на-  
ционального технического университета

Официальные  
оппоненты:

**МЫШКИН Николай Константинович**,  
академик, доктор технических наук, профессор,  
директор ГНУ «Институт механики металлополи-  
мерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»;

**КУКАРЕКО Владимир Аркадьевич**,  
доктор физико-математических наук, доцент, на-  
чальник Центра структурных исследований и три-  
бо-механических испытаний материалов и изде-  
лий машиностроения ГНУ «Объединенный инсти-  
тут машиностроения НАН Беларуси»;

**ЧИГАРЕВ Юрий Власович**,  
доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры «Теоретическая механика и теория меха-  
низмов и машин» УО «Белорусский государствен-  
ный аграрный технический университет»

Оппонирующая  
организация

**ГНПО «Научно-практический центр Национальной  
академии наук Беларуси по материаловедению»**

Защита состоится 19 декабря 2014 г. в 14.00 на заседании совета по  
защите диссертаций Д 02. 05. 07 при Белорусском национальном тех-  
ническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимо-  
сти, 65, корп. 1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 292-24-04; e-mail:  
Pavel.Shirvel@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2014 г.

Ученый секретарь совета

по защите диссертаций Д 02. 05. 07  
кандидат физико-математических наук



Ширвель П.И.

© Остриков О.М., 2014  
©БНТУ, 2014

## 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 ученых Ю.Н. Работнова, П.А. Витязя, В.В. Клубовича, Н.К. Мышкина, Ю.М. Плескачевского, Ю.В. Василевича, А.В. Чigareва, Ю.В. Чigareва, Г.И. Михасева, В.М. Федосюка, М.А. Журавкова, М.Д. Мартыненко, Э.И. Старовойтова, В.И. Владимирова, С.В. Шилько, Л.И. Миркина, А. Лява 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.

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 неомогенной 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 приме-

няемых на практике материалов. Это особенно недопустимо в конструкциях, требующих при длительной их эксплуатации высокой степени надежности.

Таким образом, в настоящее время назрела важная научная проблема, связанная с необходимостью развития теорий двойникования и негомогенной пластичности и использования результатов этих теорий в решении задач механики деформируемого твердого тела. Решение в данной работе этой проблемы позволило вписать в механику деформируемого твердого тела новый раздел «Механика двойникования и негомогенной пластичности», который существенно дополнил в научном и практическом направлениях раздел «Механика разрушения». Наличие нового раздела, посвященного ранее не рассматривавшимся с позиций механики родственными разрушению явлениям, открывает новые возможности для широкого практического использования методов механики деформируемого твердого тела для нахождения все более широкого практического применения 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.); Ф13-021 «Механическое двойникование, особенности пластической деформации и механика формоизменения магнитных сплавов Гейслера с памятью формы» (2013–2015 гг.). Министерством образования Республики Беларусь поддержаны проекты № 20012106 «Модифицирование поверхностных слоев металлических деталей высокоэнергетической обработкой» (2001–2002 гг.) и «Решение контактных задач наномеханики с учетом двойникования и неомогенной пластичности» (2010–2011 гг.). Работа выполнялась в рамках ГПНИ «Конвергенция» (2014–2015 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 явилось развитие теории двойникования и неомогенной пластической деформации и разработка методов 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 параллельных двойников, позволяющие 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;
- 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 дисбаланса количества дислокаций на двойниковых границах на напряженное состояние у клиновидного двойника;
- получить условие равновесия клиновидного двойника при дискретном и непрерывном суммировании вклада двойникоующих дислокаций в процесс междислокационного взаимодействия, провести анализ этого условия и разработать модель развивающегося двойника;
- применить мезоскопическую дислокационную модель для расчета полей напряжений у нанодвойника линзовидной формы, 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, указывающих на аналогию развития процессов двойникования и негомогенной пластической деформации, 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 параллельных полос сдвига.

**Объектом исследования** являлись 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 двойникоующихся 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 ре-

шении современных задач механики деформируемого твердого тела учета двойникования и негомогенной 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. Численно-аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния в двойникующемся деформированном твердом теле при наличии в нем механического нанодвойника, использующий приближение дискретного распределения дислокаций на границах двойника и позволяющий учитывать роль винтовой и краевой составляющей вектора Бюргерса частичной двойникующей дислокации в характере распределения нормальных и сдвиговых напряжений у некогерентного нанодвойника. Метод позволил рассчитать опасные для зарождения разрушения поля внутренних напряжений, смещений и деформаций у клиновидных, линзовидных и параллельных наноразмерных двойников и показал необходимость учета двойникования в механике деформируемого твердого тела в методиках прогнозирования зарождения разрушения в широко используемых на практике двойникующихся материалах таких, как сплавы на основе железа, никеля, кобальта, меди, цинка, титана, алюминия и др.

2. Основанный на положениях механики разрушения, результатах экспериментальных исследований и глубоком физико-механическом обосновании метод расчета напряженно-деформированного состояния у клиновидного механического двойника, использующий приближение непрерывного распределения двойникующихся дислокаций на двойниковых границах. Метод позволил оценить уровень концентрации опасных для зарождения разрушения напряжений у остаточных некогерентных, не тонких и неплоских двойников, что ранее не позволяли сделать методы, основанные на модели тонкого двойника. Это дало возможность повысить точность прогнозирования обусловленного двойникованием разрушения на стадии накопления повреждений в широко используемых на практике двойникующихся материалах.

3. Методика численно-аналитического расчета полей напряжений в упругом полупространстве, к поверхности которого приложены сосредоточенные или распределенные нагрузки при наличии остаточных механических клиновидных двойников с различной формой границ, которая позволила учесть напряжения, создаваемые клиновидными двойниками и показать, необходимость учета двойникования в формировании напряженно-деформированного состояния в двойникующихся материалах, так как некогерентные двойники способны существенно (более  $10^6$  раз) увеличивать уровень напряжений в тех областях, в которых согласно классическим методам расчета высокий уровень напряжений не прогнозируется. Методика дала возможность разработать способ управления прочностными характеристиками двойникующихся материалов с помощью распределенных нагрузок и улучшить прогнозирование зарождения разрушения в двойникующихся материалах на стадии накопления повреждений.

4. Методика расчета полей напряжений у часто являющихся причиной зарождения двойников элементарных концентраторов напряжений – точечного источника расширения или полной дислокации, в случае их нахождения внутри линзовидного нанодвойника. В отличие от известных, разработанная методика численно-аналитического расчета впервые позволила выявить закономерности эволюции полей напряжений у являющегося двойниковым зародышем нанодвойника в зависимости от мощности находящегося внутри него концентратора напряжений. Результаты позволили разработать способ управления на стадии накопления повреждений процессом зарождения обуславливающего зарождение трещин двойникования в важных для машиностроения сплавах на основе железа, никеля, кобальта, меди, цинка, титана, алюминия и др.

5. Основанные на квазидислокационном подходе методы расчета напряженно-деформированного состояния в изотропных твердых телах на этапе негомогенной пластической деформации – явлении, родственном двойникованию и разрушению. В отличие от известных, разработанные методы позволили впервые установить, что распределение напряжений у полос сдвига в аморфных материалах проявляет схожесть с их распределением у границ двойников. Данные методы открыли возможность прогнозирования областей зарождения разрушения при проявлении во время деформирования не-



гомогенной пластической деформации в таких материалах нового поколения, как металлические стекла.

#### **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. Го-

меле; IV Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика – 2009» в г. Минске.

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 100 научных работ, среди которых 1 монография, 81 статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках (среди них 70 статей соответствуют Перечню научных изданий Республики Беларусь и Российской Федерации, определенных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований), 16 тезисов докладов на Международных конференциях и 2 патента на изобретения. Общий объем публикаций составил 321 авторский лист.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 190 страницах, общий ее объем составляет 392 страницы, включая 260 рисунков, 4 таблицы, библиографию из 204 наименования и 4 приложения на 132 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.

Рассмотрен вклад известных механиков в теорию дислокаций. При этом в результате исторического рассмотрения вопроса показано, что механика дислокаций была разработана задолго до их открытия. Различие в рассмотрении дислокаций в механике деформируемого твердого тела и в физике конденсированного состояния состоит в том, что в механике дислокация рассматривается в сплошной среде без учета ее атомного строения, а в физике – с позиций атомного строения вещества.

Показано, что в настоящее время существует постановка задачи о деформируемом твердом теле с дислокациями, которая в работе С.П. Киселева представлена в следующем виде:

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

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

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

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

$$\alpha_{ji} = \varepsilon_{jsp} \frac{\partial \beta_{pi}}{\partial x_s},$$

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 ненагруженно-го 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.

Приведенная постановка задачи с успехом может быть применена и для деформируемого твердого тела с двойниками и полосами сдвига. Проблема заключается в расчете внутренних напряжений, обусловленных двумерными дефектами. Решению этой проблемы и посвящена данная работа.

Двойникование кристаллических твердых тел и образование полос сдвига в аморфных материалах под действием внешней нагрузки являются процессами родственными разрушению. С точки зрения механики двумерные дефекты, возникающие в деформируемом твердом теле, рассматриваются как неоднородности в сплошной среде или как концентраторы напряжений. Двойникование анизотропных твердых тел проявляется преимущественно в случаях, когда затруднено скольжение. В то же время, полосы сдвига, являющиеся каналами негомогенной пластической деформации в изотропных телах, проявляются, как правило, тогда, когда исчерпан резерв гомогенной пластичности.

Объединить разрушение, двойникование и негомогенную пластичность в класс родственных явлений позволила схожесть процессов развития данных каналов реакции твердого тела на деформирование и общность основанного на методах континуальной теории дислокаций математического аппарата, используемого для описания данных явлений. Рассматриваемые процессы в деформируемых твердых телах часто протекают одновременно, накладывая друг на друга существенное влияние. С точки зрения механики деформируемого твердого тела эти явления объединяет общность постановки задач и методов их решения, основанных на представлениях сплошности среды.

В настоящее время в литературе представлен обширный материал по результатам исследования двойникования кристаллов и негомогенной пластической деформации аморфных материалов. Суще-

ствующие 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 разработке численно-аналитических методов описания обширных экспериментальных данных и развитии теории двойникового кристаллов и неомогенной пластической деформации аморфных материалов и применение этой теории для решения задач механики деформируемого твердого тела.

На основании опытов Р.И. Гарбера И.М. Лифшицем была предложена макроскопическая модель двойникового кристаллов. Эта модель позволила показать целесообразность представлений о нелинейной зависимости между тензором напряжений  $\sigma_{ik}$  и тензором деформаций  $\varepsilon_{ik}$ , 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 двойникового 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 Бюргерса, 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 (наномасштабной) дислокационной модели нетонкого остаточного механического клиновидного двойника, след плоскости двойникового которого совпадает с направлением развития двойника. В основу модели легли результаты экспериментальных исследований и математические подходы, принятые 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 эффективный способ расчета полей напряжений, смещений и деформаций. Обобщенное соотношение для расчета, например, напряжений у клиновидного двойника на наномасштабном 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  $OB$  клиновидного 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.

Разрабатываемая модель клиновидного двойника, названа мезоскопической. Это связано с использованием в ней промежуточного масштабного уровня, который находится между атомным и мезоскопическим уровнем абстрагирования. Так как рассматриваемые на этом масштабном уровне двойники имеют длину, как правило, не превышающую несколько сотен нанометров, то альтернативным

названием разработанной модели можно считать название наномасштабной модели.

В существующих теориях двойникования, как правило, пренебрегается величиной ступеньки, которую образует двойник на поверхности твердого тела. Такое допущение не отвергает существование поворота кристаллической решетки, обусловленного двойникованием, а связано с пренебрежимо малой величиной ступеньки по сравнению с геометрическими параметрами двойника. Тем более такое допущение целесообразно в случае образования двойника вдали от поверхности твердого тела, когда вызванные поворотом кристаллической решетки геометрические изменения компенсируются пластической деформацией у устья двойника. Не изменяя традициям, в диссертации принято такое же допущение, которое целесообразно в рамках механики деформируемого твердого тела, где исходя из гипотезы сплошности среды, протекающие на атомном уровне процессы, не рассматриваются.

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 математические соотношения удобные для анализа напряженно-деформированного состояния у вершины двойника клиновидной формы. С использованием этих соотношений дана количественная оценка эволюции 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 увеличиваются, а скорость роста напряжений и деформаций уменьшается. Количественными расчетами показано, что величина напряжений и деформаций у вершины двойника зависит от расстояния между соседними двойникующими дислока-



циями 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 геометрические параметры двойников с энергетическими характеристиками. Расчет энергии велся на основе суперпозиции упругой энергии, энергии взаимодействия между двойническими дислокациями, энергии взаимодействия двойнических дислокаций с поверхностью твердого тела и энергии дефектов упаковки. 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 двойнических дислокаций.

На основании анализа баланса сил, действующих на вершинную двойническую дислокацию, на мезоскопическом уровне получено условие равновесия клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений. При помощи данного условия выведено соотношение для определения величины сил неупругой природы, обеспечивающих равновесную форму двойника.

Разработана мезоскопическая дислокационная модель развивающегося двойника, позволяющая определять поля напряжений у клиновидного двойника в любой момент времени при согласованном движении двойнических дислокаций. В модели учтен процесс генерирования двойнических дислокаций. Показано, что в этом случае фронт высокого уровня напряжений увлекается за движущейся вершиной двойника.

**В главе 3 «Макроскопическая дислокационная модель заклинившихся двойников и ее применение в контактных задачах механики деформируемого твердого тела»** развивается макроскопическая дислокационная модель остаточного механического клиновидного двойника. При этом двойник рассматривается на таком масштабном уровне, когда расстояние между двойническими 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 не-

применимо приближение тонкого двойника. Разработанная модель позволила вести расчет полей напряжений внутри двойника и учитывать вклад в напряженное состояние формы двойниковых границ.

В решении поставленной задачи важна разработка методов расчета внутренних напряжений, обусловленных двойникованием, или негомогенной пластичностью. На рисунке 1 схематически представлен остаточный механический 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

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

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

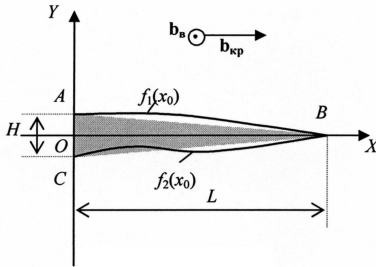
Здесь  $\sigma_{ij}^{(1)}$  и  $\sigma_{ij}^{(2)}$  – напряжения, создаваемые каждой из границ клиновидного двойника и определяемые с помощью криволинейного интеграла вдоль профилей двойниковых границ  $L_{AB}$  и  $L_{CB}$  соответственно (рисунок 1);  $\sigma_{ij}^{(1,0)}$  и  $\sigma_{ij}^{(2,0)}$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

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

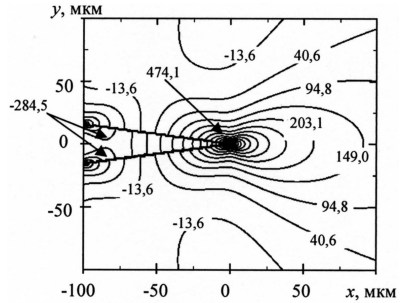
$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(x_0))^2} \rho_1(x_0) \sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y, x_0) dx_0;$$

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

Здесь  $f_1(x_0)$  и  $f_2(x_0)$  – функции, описывающие форму границ клиновидного двойника (рисунок 1);  $x_0$  – параметр интегрирования.



**Рисунок 1 – Схематическое изображение остаточного механического клиновидного двойника и направления компонент вектора Бюргерса двойникующих дислокаций**



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

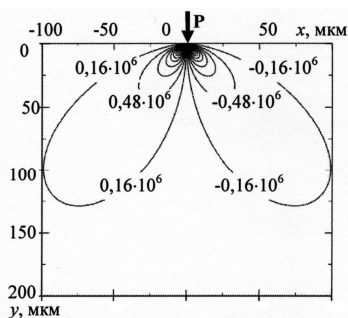
Аналогичным способом могут быть рассчитаны и напряжения у наблюдаемых на эксперименте двойников с выпуклыми или вогнутыми границами, а также у двойников с произвольной формой границ.

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.

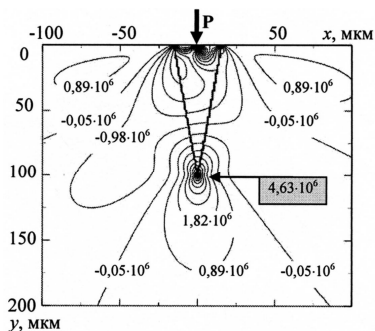
Впервые на основании дислокационной макроскопической модели рассчитаны напряжения внутри клиновидного двойника. Показано, что при прямолинейных границах двойника напряжения  $\sigma_{xy}$  внутри него распределены неравномерно, но симметрично по отношению к направлению развития двойника.

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 и 4). На конфигурацию данных напряжений существенное влияние оказывают напряжения, созданные двойником. Однако внешними нагрузками можно управлять местом расположения локализации напряжений в приповерхностной области.

В главе 4 «Методика расчета внутренних напряжений у наноразмерных, линзовидных и параллельных двойников» разработаны дислокационные модели для расчета напряженно-деформированного состояния у нанодвойников и остаточных параллельных двойников.



**Рисунок 3 – Распределение сдвиговых напряжений в упругом изотропном полупространстве при действии на поверхности в точке  $O$  сосредоточенной нормальной силы  $P$  величиной 100 Н**



**Рисунок 4 – Распределение сдвиговых напряжений у клиновидного двойника при действующей в точке  $O$  сосредоточенной нормальной силы  $P$**

Модель позволила рассматривать начальные стадии развития механических двойников, которые имеют важное значение в процессе двойникования. В диссертационной работе впервые проведен расчет полей напряжений у нанодвойника. Получены условия равновесия нанодвойника, на основании которых проведен расчет компонент неупругих сил сопротивления развития двойнику, обеспечивающих его равновесную форму.

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. Одним из таких условий является необходимость наличия концентрации напряжений, в качестве которого в данном случае рассмотрен точечный источник напряжений. 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 двойникующих дислокаций и развитие двойника происходят при разном знаке напряжений.

Источниками двойникующих дислокаций часто выступают полные дислокации, расщепляющиеся на частичные двойникующие дислокации. Поэтому важное значение имеет проведенный расчет полей напряжений у двойникового зародыша, внутри которого находится полная дислокация.

На основании метода электростатической аналогии разработана модель линзовидного двойника, позволившая решить трехмерную задачу о расчете полей напряжений у двойника. Потенциал упругого поля, создаваемого линзовидным двойником аналогичен потенциалу электрического поля, созданного зарядом, распределенным на поверхности линзы. Этот потенциал имеет вид:

$$\varphi^*(\vec{r}) = k^* \iint_{S'} \frac{\sigma(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dS',$$

где  $k^*$  – постоянная;  $\sigma(\vec{r})$  – плотность заряда, распределенного по поверхности  $S'$  линзовидного двойника;  $\vec{r}$  и  $(\vec{r} - \vec{r}')$  – радиус-векторы, определяющие точки в пространстве и на поверхности линзы.

Для удобства расчетов, рассматриваемый потенциал представляется в виде совокупности двух потенциалов  $\varphi_1(x, y, z)$  и  $\varphi_2(x, y, z)$ :

$$\varphi^*(x, y, z) = \varphi_1(x, y, z) \pm \varphi_2(x, y, z),$$

где

$$\varphi_1(x, y, z) = k^* \sigma_0 \times$$

$$\times \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{L/2} \frac{\sqrt{1 + \frac{4\rho^2}{R^2 - \rho^2}} \rho d\rho}{\sqrt{(x - \rho \cos \varphi)^2 + (y - \rho \sin \varphi)^2 + \left( z - \left( \frac{H}{2} - \frac{R}{2} \right) - \sqrt{\frac{R^2}{4} - \rho^2} \right)^2}};$$

$$\varphi_2(x, y, z) = k^* \sigma_0 \times$$

$$\times \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{L/2} \frac{\sqrt{1 + \frac{4\rho^2}{R^2 - \rho^2}} \rho d\rho}{\sqrt{(x - \rho \cos \varphi)^2 + (y - \rho \sin \varphi)^2 + \left( z - \left( \frac{R}{2} - \frac{H}{2} \right) + \sqrt{\frac{R^2}{4} - \rho^2} \right)^2}}.$$

Здесь  $\sigma(x', y', z') = \text{const} = \sigma_0$ ;  $\rho$  и  $\varphi$  – полярные координаты;  $R = (L^2 + H^2)/(4H)$ ;  $L$  и  $H$  – половина длины и ширины двойника соответственно.

Связь между смещением  $\vec{u}$  и  $\varphi^*$  находится из соотношения

$$\vec{u} = \text{grad} \varphi^*.$$

Отсюда получаем

$$\vec{u} = u_x \vec{i} + u_y \vec{j} + u_z \vec{k},$$

где

$$u_x = \frac{\partial \varphi^*}{\partial x}; \quad u_y = \frac{\partial \varphi^*}{\partial y}; \quad u_z = \frac{\partial \varphi^*}{\partial z},$$



а  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  – ортонормированный базис, единичные векторы которого направлены вдоль осей декартовой системы координат.

Справедливы также и соотношения, связывающие потенциал  $\varphi^*$  с деформациями:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial y^2}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial z^2};$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial x \partial y}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial x \partial z}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial y \partial z}.$$

Далее очевидны соотношения для расчета напряжений у линзовидного двойника:

$$\sigma_{xx} = 2\mu\varepsilon_{xx} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}),$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu\varepsilon_{yy} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}),$$

$$\sigma_{zz} = 2\mu\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}),$$

$$\tau_{xy} = \mu\varepsilon_{xy}; \quad \tau_{xz} = \mu\varepsilon_{xz}; \quad \tau_{yz} = \mu\varepsilon_{yz}.$$

На основании разработанных моделей показана возможность расчета полей напряжений у параллельных двойников. Изучена роль поверхности в формировании напряженного состояния у группы параллельных двойников на основании соответствующей методики расчета. Показано, что поверхность способствует локализации у нее напряжений и увеличению их уровня внутри системы параллельных двойников.

Впервые решена задача механики деформируемого твердого тела по расчету напряжений в упругом полупространстве, деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой, с учетом напряжений, создаваемых параллельными двойниками. Показана необходимость учета двойникования при прогнозировании ресурса

материала, так как в случае множественных параллельных двойников опасная для зарождения разрушения концентрация напряжений возрастает. При этом для расчета напряжений у системы параллельных двойников использовалась суперпозиция соотношений:

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

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

где  $N_{\text{дв}}$  – число двойников, входящих в группу параллельных двойников.

**В главе 5 «Использование квазидислокационного подхода в моделировании негомогенной пластической деформации изотропных твердых тел»** методом экспериментальной механики, основанном на локальном дозированном деформировании поверхности, исследовалась родственная двойникованию и разрушению негомогенная пластическая деформация аморфных многокомпонентных сплавов на основе железа, являющихся модельным материалом для изотропных твердых тел. Выявлено два типа полос сдвига, возникающих у отпечатка пирамиды Вика: в виде лучей и полукольцев (чешуйчатых навалов), окаймляющих отпечаток индентора.

Отличительной особенностью в процессе формирования полос сдвига типа полукольцев является то, что их развитие не ограничено упорядоченностью структуры, как в случае монокристаллов, а происходит вдоль направления действия максимальных сдвиговых напряжений, в связи с чем, чешуйчатые навалы имеют округлую форму, а сдвиги, например, 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 неоднородностями деформируемого материала. Механизмы данного взаимодействия имеют схожесть, как в анизотропных, так и в изотропных твердых телах. В результате выявленных аналогий в развитии негомогенной пластической деформации в аморфных материалах и сдвиговой пластиче-

ской деформации в монокристаллах обоснована целесообразность в использовании дислокационного подхода в математическом описании пластической деформации металлических стекол.

Разработаны квазидислокационные (приставка «квази-» означает – реально не существующий) модели полос сдвига – основного канала негомогенной пластической деформации металлических стекол: 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.

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 конечном расстоянии от нее. Рассчитаны напряжения и распределение примесей у ветвящейся и полисинтетической полосы сдвига. Показано, что 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. Разработан численно-аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния у клиновидного нанодвойника на таком масштабном уровне, когда не пренебрегается расстоянием между двойникующими дислокациями. С помощью данного метода исследована конфигурация полей напряжений, смещений и деформаций у клиновидного нанодвойника, являющегося зародышем двойника. Установлена связь напряженно-деформированного состояния у двойника с его геометрическими параметрами. Это позволило определить места локализации напряжений у клиновидного двойника и дало возможность разработать способ прогнозирования областей зарождения разрушения в важных для практического использования двойникующихся материалах таких, как сплавы на основе железа, никеля, кобальта, меди, цинка, титана, алюминия и др. [2, 3, 5, 7, 33, 58, 64, 66, 70, 80 – 84, 92, 99].

2. Получены математические соотношения удобные для расчета напряженно-деформированного состояния у вершины двойника клиновидной формы в области, где высока вероятность зарождения трещин. Дана количественная оценка эволюции внутренних напряжений и деформаций в микрообластях у вершины двойника с учетом роста числа двойникующих дислокаций на двойниковых границах. Установлен нелинейный характер зависимости величины напряжений и деформаций от числа двойникующих дислокаций на двойниковых границах. При этом показано, что скорость роста напряжений и деформаций с увеличением числа двойникующих дислокаций уменьшается, что связано с увеличением длины двойника и характером перераспределения у его границ напряжений и деформаций. Благодаря данным результатам в механике разрушения для широко используемых в машиностроении и других отраслях промышленности двойникующихся материалов получен экспресс-метод оценки момента достижения стадии деформирования твердого тела, предшествующей разрушению, так как трещины преимущественно зарождаются у вершин двойников с некогерентными границами [20, 49, 82].

3. На основе суперпозиции упругой энергии, энергии взаимодействия двойникующих дислокаций со свободной поверхностью, энергии взаимодействия между двойникующими дислокациями и энергии дефектов упаковки разработан энергетический метод анализа поведения механического двойника под нагрузкой. Установлено, что на этапе зарождения двойника весомый энергетический вклад вносят энергия взаимодействия двойникующих дислокаций с поверхностью и энергия дефектов упаковки, а дальнейшее развитие двойника преимущественно зависит от энергии взаимодействия двойникующих дислокаций между собой. Практическое использование данного энергетического метода дает возможность прогнозируемого управления с помощью нагрузки процессом двойникования и связанного с ним разрушения [33, 40, 44, 56, 97].

4. Получено условие равновесия остаточного 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 двойников. На основании данного условия равновесия получен метод оценки влияния сил неупругой природы на геометрические параметры двойников. Установлено, что в двойникующихся материалах, в которых на двойникующие дислокации действует большая по величине сила неупругой природы возможно формирование равновесных двойников большей длины. Это позволило заложить основы метода управления двойникованием и связанным с ним разрушением с помощью сил неупругой природы [58, 66, 80].

5. Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния у динамического двойника. В данном методе учтен процесс генерирования двойникующих дислокаций. Показано, что в случае динамического двойника фронт высокого уровня напряжений не только увлекается за движущейся вершиной двойника, но сохраняет высокий уровень и у его устья. Метод позволил дать количественную оценку областей наиболее вероятного зарождения разрушения у развивающегося двойника [63, 80, 98].

6. На основании экспериментальных данных и глубокого физико-механического обоснования с использованием приближения непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах разработан численно-аналитический метод расчета

напряженно-деформированного состояния у клиновидного неплоского двойника с произвольной формой границ. Метод отличается от существующих тем, что не использует приближение тонкого плоского двойника. Это позволило разработать метод расчета напряженно-деформированного состояния для значительно более широкого класса двойников, для которых неприменимо приближение тонкого двойника, и которые значительно чаще встречаются в широко используемы на практике деформируемых твердых телах. Метод дает механике разрушения математический аппарат, позволяющий прогнозировать в двойникующихся твердых телах области зарождения разрушения на стадии накопления повреждений [31, 46, 47, 54, 55, 59, 68, 80].

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. Получены соотношения для расчета полей напряжений у клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла, деформируемой сосредоточенной или распределенной нагрузкой. При этом не использовалось известное приближение тонкого двойника. Показано, что напряжения в области деформирования при наличии двойника существенно (более  $10^6$  раз) 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 [46, 47, 52, 57, 65, 80, 91].

8. Разработан численно-аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния у нанодвойника линзовидной

формы. С помощью данного метода определены микро- и наноразмерные области локализации напряжений у нанодвойника. Проведен расчет полей напряжений у нанодвойника линзовидной формы при наличии внутри него точечного источника расширения или полной дислокации – простейших концентраторов напряжений, необходимых для зарождения механического двойника. В модели линзовидного двойника впервые предложено использовать принцип электростатической аналогии, что позволило перейти к решению трехмерной задачи. Результаты имеют важное значение для механики разрушения, так как дают способ управления процессом зарождения двойников, способствующих зарождению трещин [35, 41, 45, 48, 60, 94].

9. Разработан численно-аналитический метод расчета полей напряжений у параллельных двойников. Решена задача механики деформируемого твердого тела по расчету напряжений в упругом полупространстве, деформируемом сосредоточенной или распределенной нагрузкой, с учетом напряжений, создаваемых группой параллельных двойников. Показано, что с помощью нагрузки можно целенаправленно регулировать уровень и место опасной для разрушения локализации напряжений в системе параллельных двойников, уровень напряжений и вероятность зарождения трещин в которой выше, чем у единичных двойников [32, 34, 36, 38, 51, 53, 67, 79, 93].

10. На основании экспериментальных исследований выявлены аналогии между такими родственными явлениями, как негомогенная пластическая деформация металлических стекол и двойникование. Это позволило использовать дислокационный подход в математическом описании пластической деформации аморфных сплавов и разработать квазидислокационные модели полос сдвига, являющихся основным каналом негомогенной пластической деформации аморфных материалов. Показана возможность использования разработанных для двойникования численно-аналитических методов для расчета напряженно-деформированного состояния при негомогенной пластической деформации металлических стекол. Установлено, что в деформируемом аморфном материале напряжения локализуются у полос сдвига, активируя в этих областях процесс разрушения. Поэтому для повышения качества прогнозирования эксплуатационного ресурса металлических стекол важно учитывать их склонность к негомогенной пластичности. Результаты получили

практическую реализацию в производстве, науке и образовании [1, 4, 6], [8 – 19], [21 – 30], [37, 39, 42, 43, 50, 61, 62, 69], [71 – 78], [85 – 90], [95, 96, 100].

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

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 наноматериалы и двойняющиеся материалы такие, как стали различных марок, кремнистое железо, титан и сплавы на его основе, бронзы, латуни и т. д.

Взросший 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.

Широкое применение результаты работы нашли в сфере образования, 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». При этом в учебный процесс внедрена методология численно-аналитических расчетов напряженно-деформированного состояния при двойниковании и негетогенной пластической деформации деформируемых твердых тел.



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). При этом внедрены методы численно-аналитического расчета напряженно-деформированного состояния в двойникующихся материалах, материалах с памятью формы, металлических стеклах при проявлении при деформировании опасных в плане зарождения разрушения процессов двойникования и негомогенной пластической деформации в широко используемых в промышленности материалах таких, как сплавы на основе железа, никеля, кобальта, меди, цинка, титана, алюминия и др.

Практическое использование в производстве на ОАО «Белшина» получили методы исследования пластической деформации быстро-закаленных сплавов на основе железа.

В целом практическая значимость результатов обусловлена моделированием напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и сооружений, находящихся под действием заданной нагрузки, материал которых подвержен двойникованию или негомогенной пластичности. Учет в численно-аналитических методах расчета концентрации опасных для зарождения разрушения напряжений связанных с двойникованием или негомогенной пластичностью дает возможность повысить точность прогнозирования прочностных и деформационных характеристик ответственных деталей конструкционных изделий. Новизна результатов подтверждена патентами [99, 100].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Монография*

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.

### *Статьи в научных журналах*

2. 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.

3. Остриков, О.М. Нанодвойникование монокристаллов висмута / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 51–52.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Верещагин, М.Н. Моделирование напряженного состояния у полос сдвига в аморфном материале / М.Н. Верещагин, О.М. Остриков, Д.Б. Зюков // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 3. – С. 113–115.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Изучение закономерностей развития полос сдвига при нанопроиндентировании 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.

18. 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.

19. 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.

20. Остриков, О.М. Напряженное состояние у вершины клиновидного двойника / О.М. Остриков // *Известия РАН. Сер. Механика твердого тела*. – 2004. – № 2. – С. 104–113.

21. 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.

22. Верещагин, М.Н. Влияние термической обработки на неомогенную 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.

23. 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.

24. Верещагин, М.Н. Влияние инициированных высокоэнергетической обработкой фазовых превращений на электрические, механические свойства и неомогенную 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.

25. 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.

26. 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 // *Весті НАН Біларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2004. – № 4. – С. 13–15.

27. 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.

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

29. 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.

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

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

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

33. 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.

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

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

36. 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.

37. Остриков, О.М. Влияние лазерной обработки на микротвердость и негомогенную пластическую деформацию аморфных спла-

вов на основе железа / О.М. Остриков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006. – № 11. – С. 14–16.

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

39. 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.

40. 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.

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

42. 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.

43. 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.

44. 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.

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

46. 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.

47. 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.

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

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. 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.

57. Остриков, О.М. Расчет распределения примеси и потоков ее миграции у клиновидного двойника на основании макроскопиче-

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

58. 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.

59. 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.

60. 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.

61. Остриков, О.М. Пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа / О.М. Остриков // Вестник Могилевского государственного университета имени А.А. Кулешова. – 2010, № 2(36). – С. 15 – 26.

62. Остриков, О.М. Влияние режимов плазменной резки на микроструктуру, микротвердость и качество обработки углеродистых сталей / О.М. Остриков, О.С. Кузнецова // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2010. – № 1(40) – С. 33 – 38.

63. Остриков, О.М. Мезоскопическая дислокационная модель развивающегося клиновидного двойника / О.М. Остриков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2010. – № 3(42) – С. 3 – 8.

64. Василевич, Ю.В. Расчет полей смещений и деформаций у клиновидного двойника на основании мезоскопической дислокационной модели / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Вестник БНТУ. – 2011, № 4. – С. 52 – 55.

65. Остриков О.М. Напряженное состояние у поверхности кристалла, деформируемой распределенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника / О.М. Остриков // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия Машиностроение. – 2011. – № 4(70). – С. 39–43.

66. Василевич, Ю.В. Условие равновесия клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений / Ю.В. Василевич, О.М. Остриков // Наука и техника. – 2012, № 1. – С. 75–79.

67. Остриков О.М. Способ расчета полей напряжений в деформируемом упругом полупространстве при наличии у его поверхно-



сти полисинтетического двойника / О.М. Остриков // Известия РАН. Сер. Механика твердого тела. – 2012, № 3. – С. 78–88.

68. Остриков О.М. Дислокационная модель некогерентного нетонкого двойника / О.М. Остриков // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 11. – С. 38 – 42.

69. Остриков О.М. Уравнение равновесия криволинейной полосы сдвига, находящейся у поверхности аморфного материала / О.М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 17 – 21.

70. Остриков, О.М. Использование дислокационной мезоскопической модели для расчета полей напряжений, относительной объемной дилатации и сил взаимодействия в системе «клиновидный нанодвойник – полная дислокация» / О.М. Остриков // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 7 – 16.

71. Остриков, О.М. Дислокационная модель нанодвойникового композита / О.М. Остриков // Вестник Могилевского государственного университета имени А.А. Кулешова. Серия В. – 2013, № 1(41). – С. 35–46.

### *Статьи в сборниках материалов научных конференций*

72. 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 // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов : материалы X Российской научной конференции. – Екатеринбург – Челябинск : Изд-во Южноуральского государственного университета, 2001. – Т. 4. – С. 3–6.

73. Влияние прокатки и последующей термической обработки на негомогенную 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: УП Технопринт, 2004. – Т. 1. – С. 26–31.

74. Верещагин, М.Н. Влияние лазерной обработки на микротвердость и негомогенную пластическую деформацию аморфных сплавов на основе железа / М.Н. Верещагин, В.Г. Шепелевич, О.М. Остриков // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением : ма-

териалы Международной научно-технической конференции. – Минск: УП Технопринт, 2004. – Т. 1. – С. 222–226.

75. Верещагин, М.Н. Расчет полей напряжений и распределения примесей в аморфном материале на основе квадриупольно-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.

76. 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.

77. Верещагин, М.Н. Негомогенная пластическая деформация сложнотелурованных аморфных сплавов в областях импульсного лазерного воздействия / 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. 161–165.

78. 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. – Новополюцк, 2007. – Т. 1 – С. 121–124.

79. 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.

80. 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*

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

82. 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*

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. Верещагин, М.Н. Влияние термомеханической 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.

89. 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.

90. 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.

91. Остриков, О.М. Потоки 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.

92. 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.

93. 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.

94. 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.

95. Остриков, О.М. Влияние высокоэнергетической обработки на негомогенную 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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*

99. 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.

100. 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

### Лікава-аналітычныя метады разліку пластычных дэфармацый і напружанняў у зонах лакалізацыі мікрапашкоджанняў цвёрдых целаў пад дзеяннем вонкавых нагрузак

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

**Мэта працы:** развіццё тэорыі двайнікавання і негамагеннай пластычнай дэфармацыі і распрацоўка метадаў разліку напружанага стану дэфармаваных цвёрдых целаў на стадыі назапашвання пашкоджанняў.

У дысертацыйнай працы выкарыстоўваліся эксперыментальныя і тэарэтычныя метады даследаванняў. Эксперыментальныя даследаванні ляглі ў аснову распрацоўванай тэорыі і выкарыстоўваліся для праверкі атрыманых на яе аснове вынікаў. Пры гэтым для вывучэння механізмаў дэфармавання цвёрдых целаў выкарыстоўвалася метадка лакальнага дазаванага дэфармавання паверхні і аднавосевае расцяжэнне. Для тэставання структуры дэфармаваных матэрыялаў выкарыстоўваліся сучасныя метады даследаванняў такія, як атамная сілавая мікраскапія, растрвая і якая прасвечвае электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, мікранэнаспектральны аналіз. У тэарэтычных даследаваннях шырока выкарыстоўваўся метад суперпазіцыі напружанняў двайнікуючых дыслакацый, метад функцый Грына, метад электростатычнай аналогіі, кампутарнае мадэляванне.

Упершыню вырашаны задачы механікі дэфармаванага цвёрдага цела, злучаныя з разлікам напружанняў у дэфармаваным двайнікуючымся ці аморфным матэрыяле і дадзена колькасная адзнака напружанняў, абумоўленых двайнікамі ці палосамі зруху. Паказана, што двухмерныя дэфекты істотна скажаюць дэфармацыйную карціну, фармаваную вонкавымі нагрузкамі. Вынікі знайшлі практычную рэалізацыю ў сферы адукацыі і навукі і рэкамендуюцца для выкарыстання ў прамысловасці з мэтай падвышэння якасці прагназавання рэсурсу трываласці ўжывальных у машынабудаванні двайнікуючыхся і хутказагартаваных матэрыялаў.

## РЕЗЮМЕ

Остриков Олег Михайлович

### Численно-аналитические методы расчета пластических деформаций и напряжений в зонах локализации микрповреждений твердых тел под действием внешних нагрузок

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

**Цель работы:** развитие теории двойникования и негомогенной пластической деформации и разработка методов расчета напряженно-го состояния деформируемых твердых тел на стадии накопления повреждений.

В диссертационной работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследований. Экспериментальные исследования легли в основу разрабатываемой теории и использовались для проверки полученных на ее 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 электростатической аналогии, компьютерное моделирование.

Впервые решены задачи механики деформируемого твердого тела, связанные с расчетом напряжений в деформируемом двойникующемся или аморфном материале и дана количественная оценка напряжений, обусловленных двойниками или полосами сдвига. Показано, что двумерные дефекты существенно искажают 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 Mikhaylovich**

### **Numerical and analytical methods of calculation of plastic deformations and stresses in the areas of micro-localization of solids under the action of external loads**

**Keywords:** stress field, displacement, deformation twinning, inhomogeneous plastic deformation, nanotwinning

**The work purpose:** to develop the theory of twinning and inhomogeneous plastic deformation and development of methods for calculating the stress state of the deformable solids at the stage of damage accumulation.

The thesis used experimental and theoretical research methods. Experimental studies formed the wasps nova theory developed and used for the verification of the results based on it. At the same time to study the mechanisms of deformation of solids used technique of local dosed surface deformation and uniaxial tension. To test the structure of deformable materials used modern research methods such as atomic force microscopy, scanning and transmission electron microscopy, X-ray diffraction, electron microprobe analysis. In theoretical studies of widely used method of superposition of stress twinning dislocations, Green's function method, the method of the electrostatic analogy, computer simulation.

First solved the problem of solid mechanics related to the calculation of stresses in the deformable lookalike or amorphous material and quantify the stresses due to twins or shear bands. It is shown that two-dimensional defects materially affecting the deformation pattern that is generated by the external loads. The results found in the practical implementation of education and science, and are recommended for use in industry to improve the quality of forecasting resource used in mechanical strength twinning and rapidly quenched materials.