

На правах рукописи

Чжо Тун

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСЛОКАЦИОННЫХ
СКОПЛЕНИЙ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в Калужском филиале государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
доцент **Ю.С. Белов**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **С.М. Жданов**
кандидат физико-математических наук,
В.Н. Власов

Ведущая организация: ООО «МеГа Эпитех», г.Калуга

Защита состоится «01» июня 2011 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.17 при ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана» по адресу: 248600, г.Калуга, ул. Баженова, д.2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Автореферат разослан «27» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. тех. наук, доцент



С.А.Лоскутов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Дислокационные скопления образуются в кристаллических материалах, как в результате термомеханической обработки, так и вследствие работы источника Франка-Рида. Любые реальные конденсированные среды ограничены внешними поверхностями и могут иметь внутренние границы раздела. Взаимодействие дислокационных скоплений со свободной поверхностью может приводить к возникновению областей с повышенной концентрацией внутренних напряжений. С учетом современных тенденций развития технологий микро- и наноэлектроники и тонкопленочных материалов, проблема анализа различных аспектов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью, несомненно, является практически важной и актуальной.

Математический аппарат теории дислокаций позволяет рассчитывать поля смещений и напряжений для любых дислокационных конфигураций в приближении для бесконечной среды. Аналитические решения для дислокационных полей в случае ограниченной среды удастся получить лишь для отдельных частных случаев. Таким образом, для адекватного анализа разнообразных аспектов взаимодействия дислокаций со свободной поверхностью необходима разработка эффективных методов решения граничных задач теории дефектов.

Настоящая работа посвящена разработке моделей и методов исследования взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью и анализу, на основе разработанных методов, процессов взаимодействия со свободной поверхностью дислокационных скоплений. Моделирование проводилось применительно к гранецентрированным кристаллам (ГЦК). Такой выбор, наряду с практической важностью этих структур, обусловлен наличием ряда данных относительно взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью.

Целями диссертационной работы являлись:

- построение физических моделей и методик моделирования процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью;
- исследование средствами моделирования процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью применительно к ГЦК кристаллам.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан программно-вычислительный комплекс, интегрирующий операционно-вычислительную модель в

- программную среду ANSYS для исследований процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью;
- разработана оригинальная модель полевого динамического взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью;
 - при строгом учете тонкой пространственной структуры полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационными скоплениями, осуществлено моделирование процессов взаимодействия со свободной поверхностью дислокационных скоплений;
 - получены основные характеристики процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью и проведен анализ их зависимости от пространственно-ориентационных параметров системы;
 - разработаны методы расчета полей внутренних напряжений в приповерхностных областях, обусловленных неровностями свободной поверхности, и проведен анализ влияния параметров ступенек свободной поверхности на характеристики полей внутренних напряжений в приповерхностных областях;
 - при строгом учете тонкой пространственной структуры полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационными скоплениями, осуществлено моделирование взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки; получены основные характеристики данного процесса и проведен анализ их зависимости от пространственно-ориентационных параметров системы;
 - установлено, что взаимодействие дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки приводит к возникновению приповерхностных областей с повышенной концентрацией внутренних напряжений, которые могут служить источником образования микротрещин.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в том, что в работе предложен новый подход к решению задачи взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью на основе интеграции операционно-вычислительной модели в программно-вычислительную среду ANSYS. Развитые в работе методы моделирования позволяют точно учитывать пространственно-геометрические характеристики системы и тонкую структуру внутренних полей,

обуславливающих данный вид взаимодействия. Практическая ценность работы заключается также в том, что полученные в ней результаты и развитые методы могут быть использованы для количественного анализа широкого круга вопросов физики свободной поверхности, тонкопленочной техники и стимулируют постановку и проведение новых вычислительных и экспериментальных исследований граничных задач взаимодействия дислокаций.

Достоверность результатов работы обусловлена корректной постановкой задачи, применением математически обоснованных методов ее решения, сравнением результатов с аналитическими данными.

На защиту выносятся следующие положения:

- операционно-вычислительная модель полевого динамического взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью;
- методика моделирования процессов взаимодействия гибких дислокаций со свободной поверхностью, на основе интеграции операционно-вычислительной модели в программно-вычислительную среду ANSYS;
- результаты исследования средствами моделирования процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:

1. Региональных научно-технических конференциях «Научное развитие технологий в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, 2008, 2009, 2010);
2. Всероссийских научно-технических конференциях «Научное развитие технологий, в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва, 2008, 2009, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 1 статья в журнале из перечня ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Она изложена на 136 страницах текста, содержит 29 рисунков, 1 таблицу, 160 библиографических названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, ее практическое значение, формулируются основные цели исследования и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы. В ней проводится рассмотрение и анализ результатов современных исследований взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью.

Во второй главе диссертации проводится разработка методов и анализ полей внутренних напряжений, создаваемых эквидистантными и заторможенными дислокационными скоплениями. Получены и проанализированы характеристики полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационными скоплениями, составленными из винтовых и краевых дислокаций. Показано, что дислокационные скопления краевых дислокаций являются устойчивыми дислокационными образованиями. В тоже время, структура внутренних полей напряжений дислокационных скоплений, составленных из винтовых дислокаций, характеризуется отличными от нуля компонентами, которые создают моменты сил относительно оси, перпендикулярной плоскости залегания скопления. Данные обстоятельства приводят к раскачиванию дислокационного скопления и вызывают поперечное скольжение дислокаций, вследствие чего дислокационные скопления винтовых дислокаций являются неустойчивыми. Для устойчивых конфигураций свободных и заторможенных скоплений краевых дислокаций получены асимптотические оценки характеристик полей внутренних напряжений и методика аналитического расчета характеристик распределения дислокаций в скоплении.

В третьей главе диссертации проводится описание использованных и разработанных моделей и методик моделирования, а также анализ полученных результатов моделирования взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью.

Для расчета влияния реакции свободной поверхности на поля внутренних напряжений рассматривалась следующая декомпозиция задачи. Пусть исходный объем V , содержит дислокации и ограничен поверхностью S , подверженной действию внешних поверхностных сил $T_i^0 = \sigma_{ij} \cdot n_j$ и внешних смещений u_i^0 . Для декомпозиции задачи, компоненты векторных полей смещений (u) и тензорных полей деформаций (ε) и напряжений (σ) представляются в виде двух аддитивных составляющих:

$$u_i = \tilde{u}_i + \hat{u}_i, \quad \varepsilon_{ij} = \tilde{\varepsilon}_{ij} + \hat{\varepsilon}_{ij}, \quad \sigma_{ij} = \tilde{\sigma}_{ij} + \hat{\sigma}_{ij},$$

где поля $\tilde{u}_i, \tilde{\varepsilon}_{ij}, \tilde{\sigma}_{ij}$ связаны только с дислокациями текущих конфигураций, в объеме V , который считается погруженным в бесконечный континуум, т.е. считается неподверженным действию внешних поверхностных сил $T_i^0 = \sigma_{ij} \cdot n_j$ и внешних смещений u_i^0 . В свою очередь поля $\hat{u}_i, \hat{\varepsilon}_{ij}, \hat{\sigma}_{ij}$ являются компенсационными, они соответствуют бездислокационному объему, ограниченному поверхностью S , при этом, в соответствии с начальными и граничными условиями исходной задачи, начальные и граничные условия для бездислокационного объема выбираются на основе соотношений:

$$\hat{u}_i|_S = (u_i^0 - \tilde{u}_i)|_S, \quad \hat{T}_i|_S = (T_i^0 - \tilde{T}_i)|_S,$$

где смещения \tilde{u}_i и поверхностные силы \tilde{T}_i на поверхности S – интегральные характеристики, порождаемые текущими конфигурациями дислокаций, находящимися в объеме V , ограниченном поверхностью S .

Поскольку для бездислокационного объема все деформации являются упругими, решение задачи для бездислокационного объема проводится в рамках классической механики сплошных сред, на основе метода конечных элементов, в программной среде ANSYS. При этом анализ развития полной деформации в объеме в условиях воздействия внешних нагрузок и смещений решается в соответствии со следующим алгоритмическим циклом:

1-ый этап (расчет дислокационного влияния)

Для заданной пространственной конфигурации дислокаций внутри объема V , в предположении отсутствия у объема свободной поверхности, воздействия полей внешних нагрузок и смещений, производится расчет порождаемых дислокациями полей $\tilde{u}_i, \tilde{\varepsilon}_{ij}, \tilde{\sigma}_{ij}$ на поверхности S ;

2-ой этап (реакция упругого бездислокационного континуума)

Для вычисленных на первом этапе значений \tilde{T}_i, \tilde{u}_i на поверхности S определяются граничные условия $\hat{T}_i = T_i^0 - \tilde{T}_i, \hat{u}_i = u_i^0 - \tilde{u}_i$, и, средствами ANSYS, решается краевая задача нахождения полей $\hat{u}_i, \hat{\varepsilon}_{ij}, \hat{\sigma}_{ij}$ внутри объема V ;

3-ый этап (обновление дислокационных конфигураций)

На основании найденных полей $\hat{u}_i, \hat{\varepsilon}_{ij}, \hat{\sigma}_{ij}$, действующих внутри объема V , производится анализ динамического поведения дислокаций и производится расчет их новых конфигураций.

Для обновленных пространственных конфигураций дислокаций осуществляется переход к 1-ому этапу, и циклическая процедура повторяется до тех пор, пока погрешность выполнения исходных граничных условий на поверхности S превышает порог задаваемой точности δ .

Разработанный программно-вычислительный комплекс, функционирует на основе пяти модулей (см. рис.1).

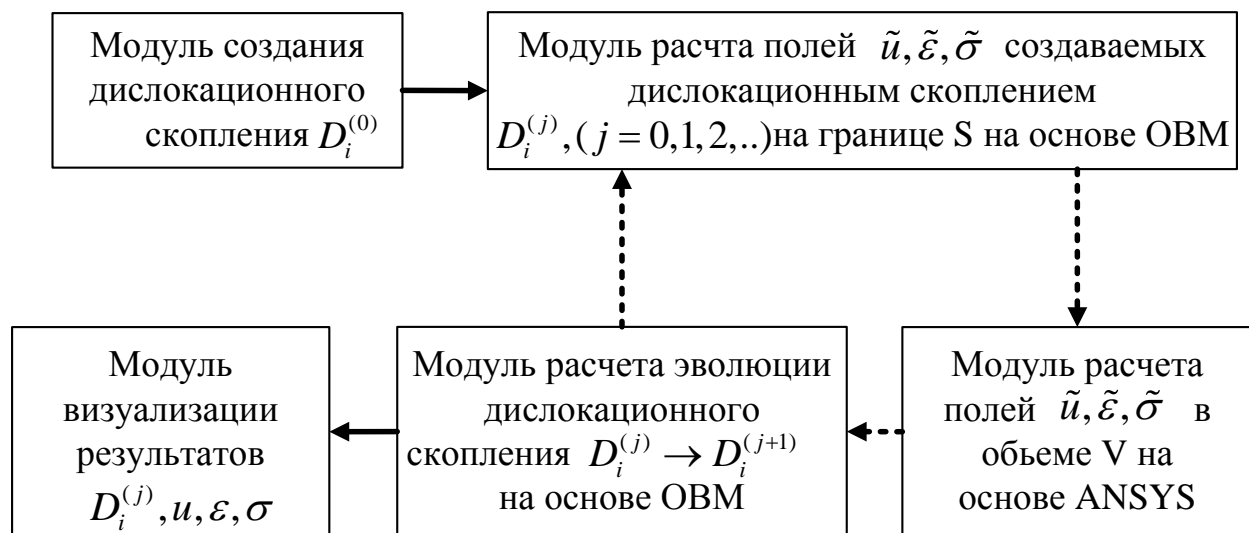


Рис.1. Модульное представление вычислительного комплекса

Первый модуль обеспечивает начальный ввод в заданный объем V с границей S исходных дислокаций $D_i^{(0)}$, в соответствии с решаемыми задачами.

Второй модуль производит расчет необходимых полей, создаваемых на исследуемой границе S текущими конфигурациями дислокаций $D_i^{(j)}$, $(j=0,1,2,..)$.

Третий модуль, в соответствии с концепцией декомпозиции операционно-вычислительной модели (ОБМ), средствами универсальной вычислительной среды ANSYS, производит расчет компенсационных полей в объеме V .

Четвертый модуль реализует возможные изменения текущих конфигураций дислокаций с учетом компенсационных полей, вычисляемых в третьем модуле.

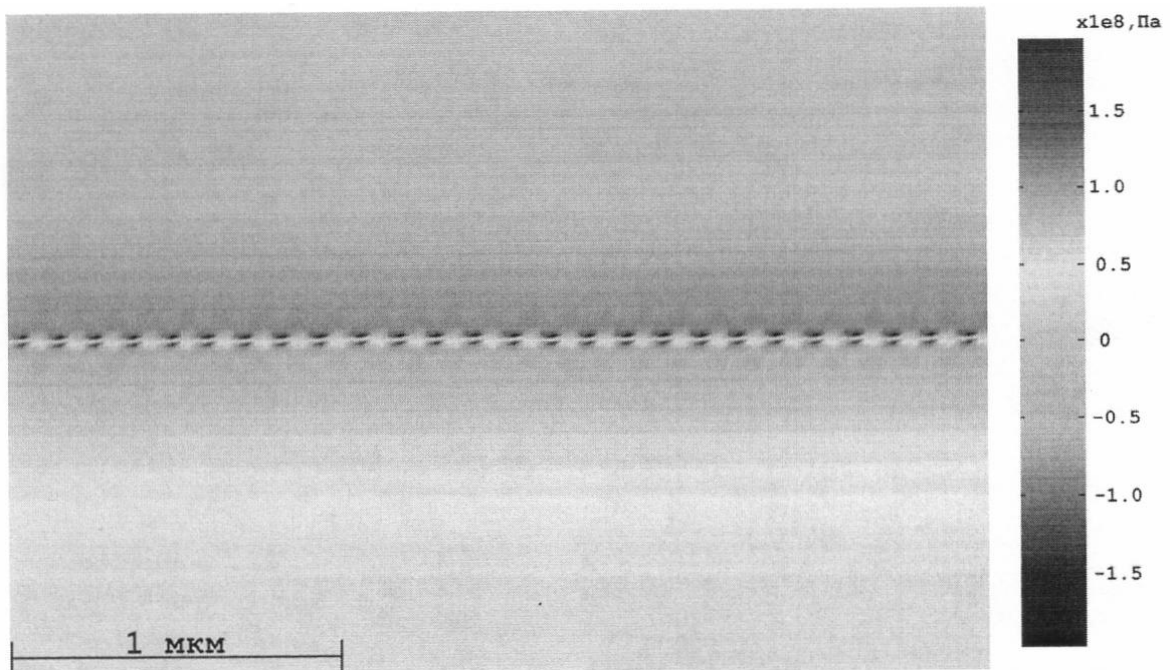
Пятый модуль обеспечивает визуализацию и наглядное представление необходимых результатов в процессе функционирования комплекса.

Численные расчеты полей $\tilde{\gamma}_i, \tilde{\epsilon}_{ij}, \tilde{\sigma}_{ij}$, порождаемых криволинейными дислокациями, целесообразно производить на основе параметрического описания, поскольку введение отображения криволинейной дислокационной конфигурации на скалярный параметрический интервал $\{\omega \in [0,1]\}$ позволяет свести нахождение дислокационных полей напряжений к процедурам быстрого численного расчета квадратурных сумм. В этом случае эволюционные изменения дислокаций определяются вариационным путем в соответствии с операционно-вычислительной моделью квазидинамического моделирования дислокаций.

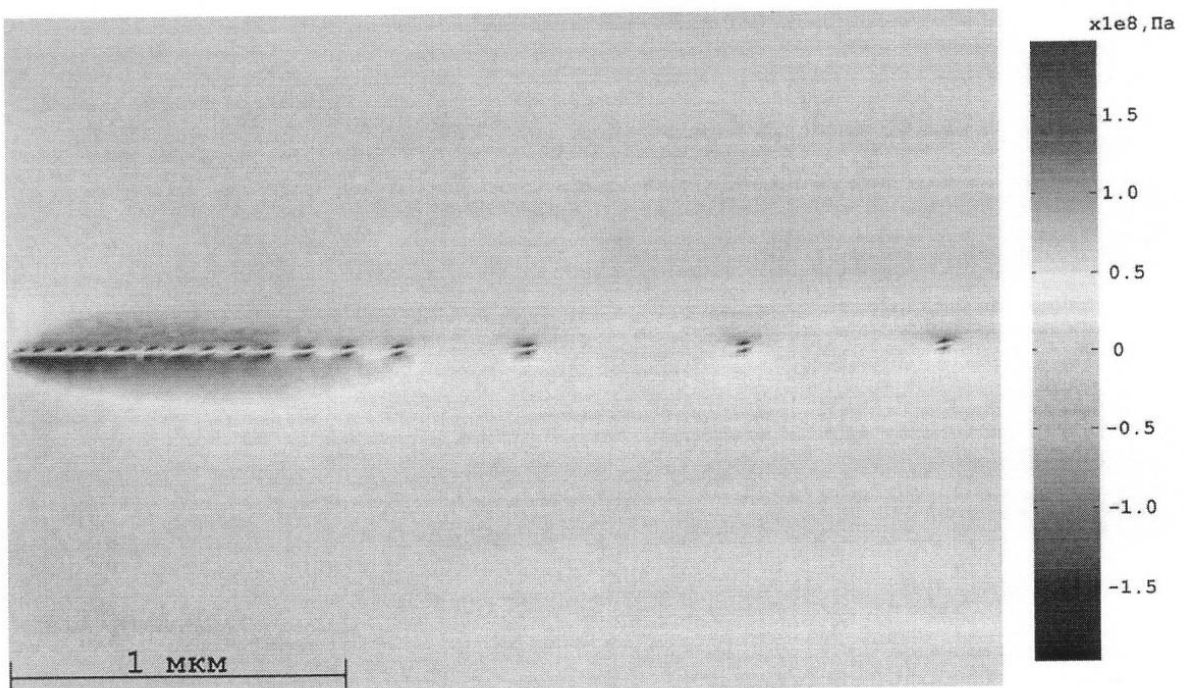
На рис.2 представлены эпюры полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационным скоплением в приближении бесконечного континуума (рис.2а) и с учетом влияния свободной поверхности (рис.2б).

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие особенности. Прежде всего, учет влияния свободной поверхности приводит к ярко выраженному перераспределению дислокаций в скоплении и изменениям соответствующих характеристик полей внутренних напряжений. При этом функциональные зависимости, получаемые аналитическими методами, не отражают характерных особенностей распределения дислокаций в скоплении, полученных на основании проведенного моделирования (см. рис.3).

Результаты моделирования позволили установить существование симметричных относительных значений x/l областей, в пределах которых изменения плотности дислокаций в скоплении по мере приближения к границе свободной поверхности существенно различаются. Первая область, которой отвечают интервалы $(-0,4 \div 0)$ и $(0 \div 0,4)$, характеризуется относительно невысокой плотностью дислокаций, которая в пределах данных интервалов остается практически неизменной. Для второй области, в пределах интервалов $(-0,7 \div -0,5)$ и $(0,5 \div 0,7)$, наблюдается стремительный рост плотности дислокаций по мере приближения к границе свободной поверхности. Наконец, в третьей области, для интервалов $(-1 \div -0,7)$ и $(0,7 \div 1)$, наблюдаются самые высокие значения плотности дислокаций в скоплении, которые практически остаются неизменными в пределах данных интервалов.



а)



б)

Рис.2. Поля напряжений и распределение дислокаций в дислокационном скоплении: без (а) и с учетом (б) влияния свободной поверхности

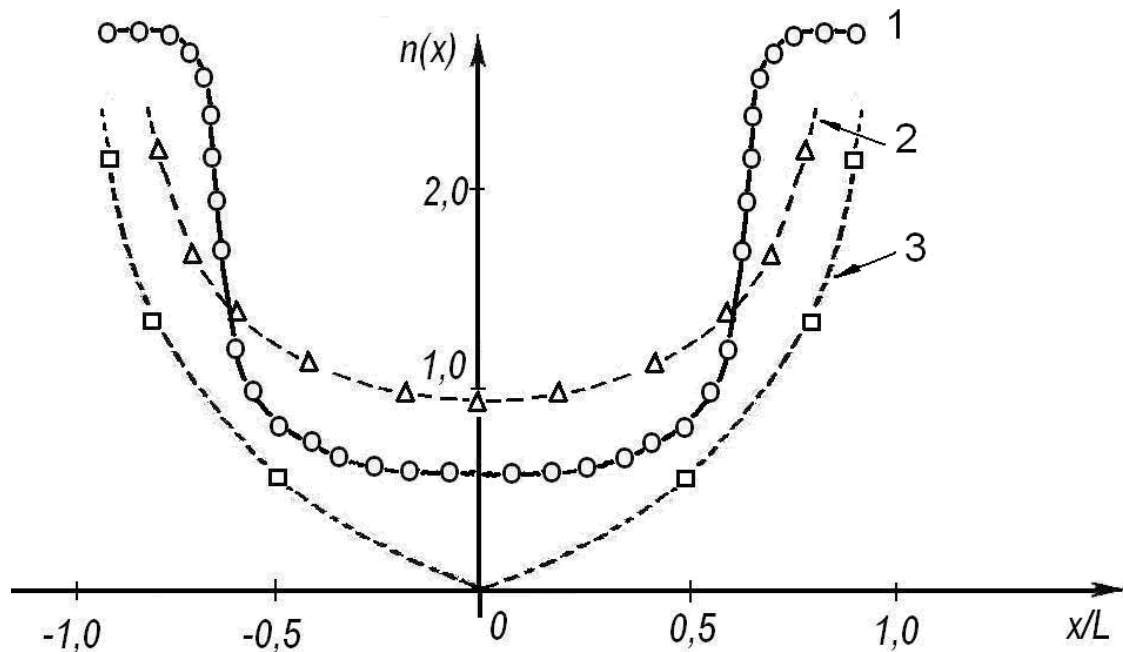


Рис.3. Распределения дислокаций в скоплении, взаимодействующем со свободной поверхностью: 1 – результаты моделирования; 2, 3 – аналитические результаты

Сопоставление аналитических оценок равновесного перераспределения дислокаций в скоплении в результате влияния свободной поверхности (кривые 1,2 рис.3) с данными моделирования (кривая 3 рис.3) свидетельствует о сложном, многофакторном характере взаимодействия свободной поверхности с дислокационным скоплением, который, в силу неизбежных упрощающих предположений, не удастся выявить аналитическими методами.

При своем движении дислокационные скопления могут выходить на свободную поверхность под разными углами. На рис.4 представлены компоненты поля внутренних напряжений $\Delta\tilde{\sigma}_{ij}$, создаваемых дислокационными скоплениями, взаимодействующими со свободной поверхностью при различных значениях угла ψ , который характеризует наклон плоскости скольжения дислокаций скопления к плоскости свободной поверхности. Напряжения представлены в относительных единицах

$$\Delta\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^{yBII}(P)}{\sigma_{ij}(P)}, \text{ где } \sigma_{ij}^{yBII}(P), \quad \sigma_{ij}(P) \text{ – напряжения, полученные,}$$

соответственно, с учетом и без учета влияния свободной поверхности.

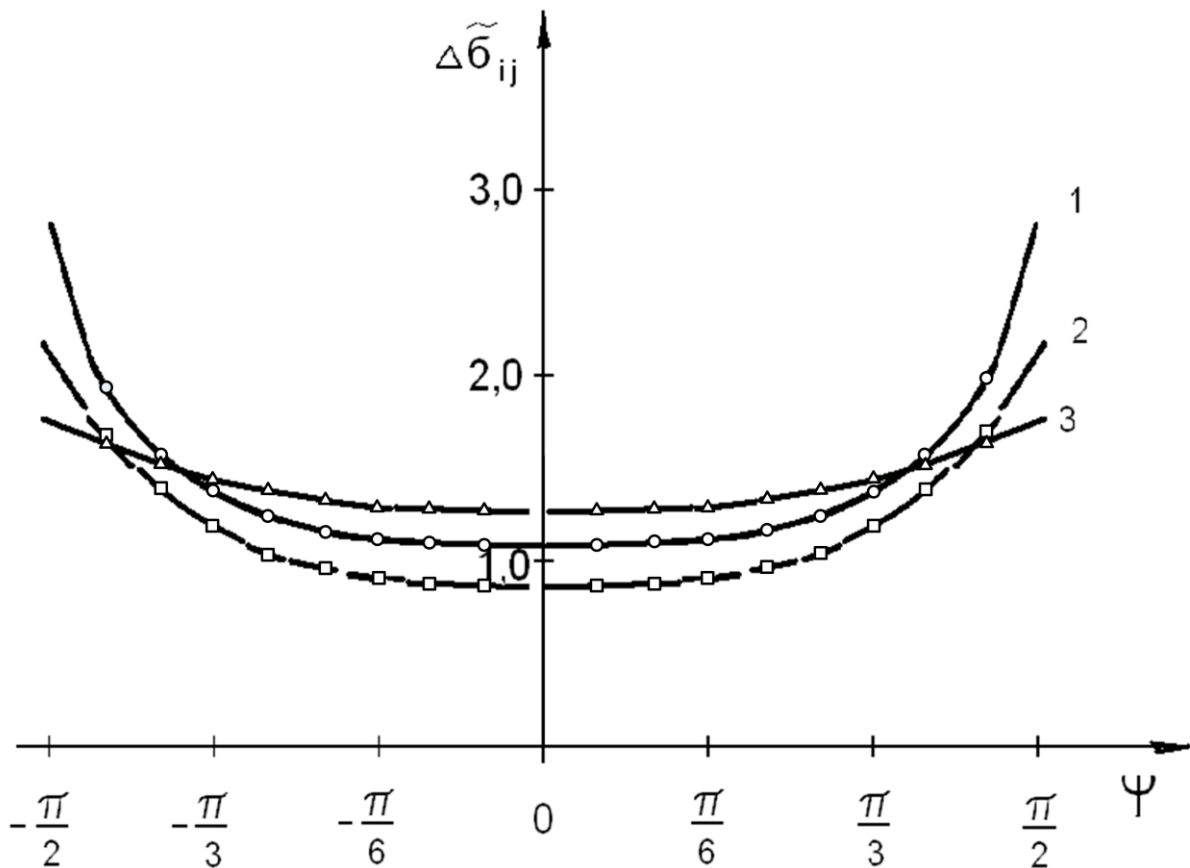


Рис.4. Зависимости от угла ψ избыточных значений полей внутренних напряжений: σ_{xx} (1), σ_{yy} (2), σ_{xy} (3)

Полученные результаты показывают, что изменение параметра ψ различным образом влияет на компоненты полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационным скоплением. Можно видеть, что для полей внутренних напряжений, в областях избыточных значений, при значениях угла ψ близких к $\pm \frac{\pi}{2}$, происходит почти трехкратное увеличение напряжения σ_{xx} , практически двукратное увеличение напряжения σ_{yy} и, примерно в полтора раза, увеличивается значение напряжения σ_{xy} .

В процессе пластической деформации дислокации выходят на свободную поверхность, при этом на поверхности образуются ступеньки. В этой связи большой интерес представляет исследование взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки. Моделированию данных процессов и анализу полученных

результатов посвящена **четвертая глава** диссертации. При моделировании предполагалось, что ступеньки свободной поверхности характеризуются двумя параметрами: высотой h и углом φ . Значения угла φ варьировались с шагом $\Delta\varphi=5^\circ$ в интервале значений от 5° до 175° . В соответствии с известными экспериментальными данными, характеристики распределения ступенек оказываются близкими к нормальному распределению Гаусса со значениями среднего и среднеквадратичного отклонения соответственно равными $\bar{h}=160\cdot b$, $\sigma_h=70\cdot b$, где b – вектор Бюргера, образующей ступеньку дислокации. Физические параметры моделирования выбирались применительно к кристаллам меди, значения модуля сдвига G , коэффициента Пуассона ν и вектора Бюргера b составляли значения соответственно равные: $G=54,6$ ГПа; $\nu=0,32$; $b=2,56\cdot 10^{-10}$ м.

Наряду с изменением параметра φ , характеризующего угол наклона ступеньки к свободной поверхности, в процессе моделирования был проведен анализ влияния угла ψ , который характеризует наклон плоскости скопления дислокаций скопления к плоскости свободной поверхности. Значения параметрически задаваемого угла ψ также изменялись с шагом $\Delta\psi=5^\circ$ в интервале значений от -85° до $+85^\circ$.

На рис.5, для различных значений параметра φ , представлены зависимости от угла ψ избыточных значений внутренних напряжений $\Delta\tilde{\sigma}_{ij}^\Sigma$. Избыточные напряжения представлены в относительных единицах

$$\Delta\tilde{\sigma}_{ij}^\Sigma = \frac{\sigma_{ij}(P)}{\sigma_{ij}(N)}, \text{ где } \sigma_{ij}(P), \sigma_{ij}(N) \text{ – характерные избыточные напряжения,}$$

полученные, соответственно, с учетом и без учета влияния свободной поверхности содержащей ступеньки. Как видно из графиков, взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки, могут приводить более чем к пятикратному увеличению внутренних полей напряжений. Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют сделать заключение, что в результате взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки образуются области избыточных внутренних напряжений, которые могут служить источником зарождения приповерхностных микротрещин.

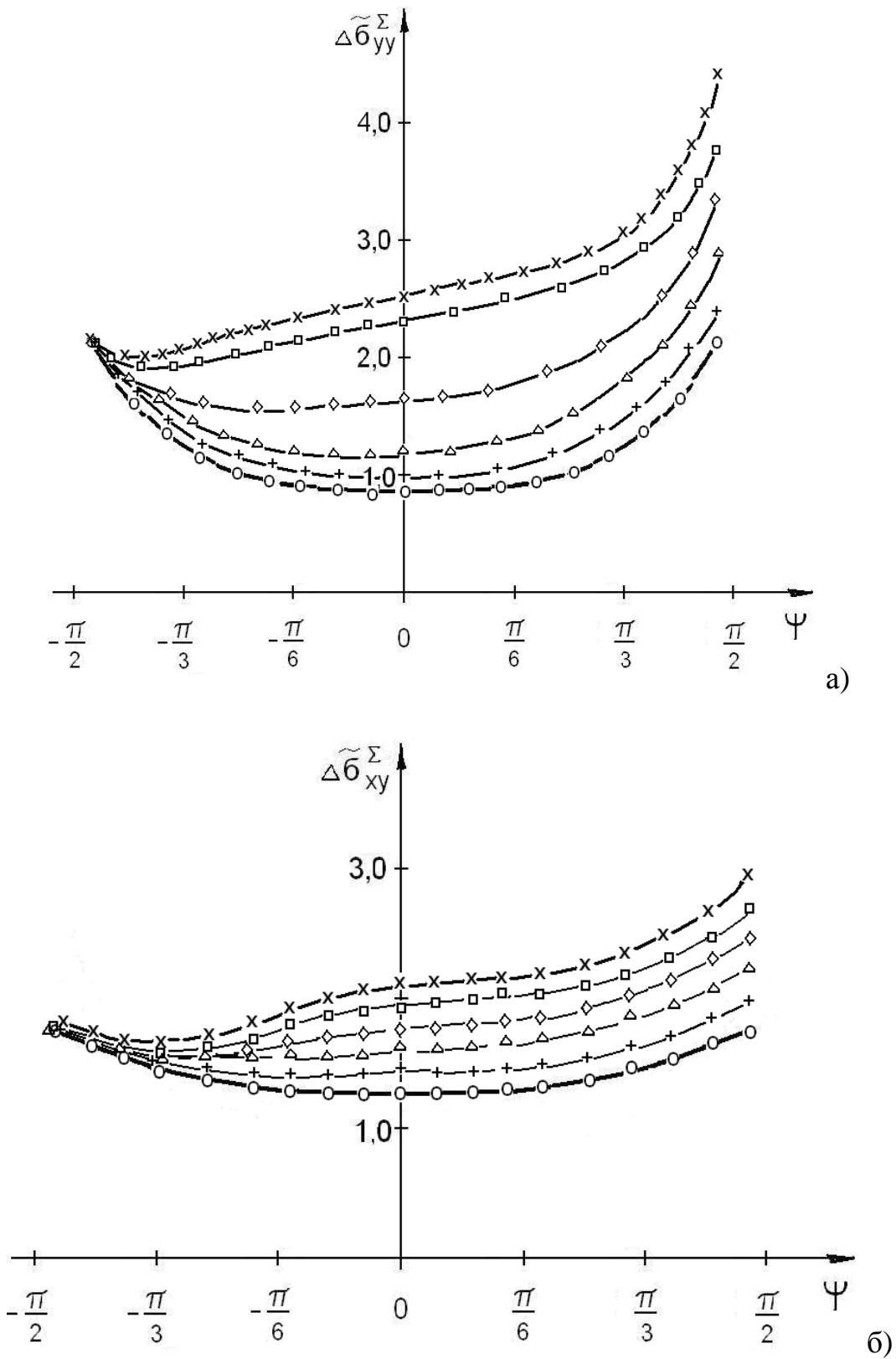


Рис.5. Зависимости от угла ψ избыточных внутренних напряжений: σ_{yy} (а), σ_{xy} (б), σ_{xx} (в) для $\varphi=10^\circ$ (○); 20° (+); 30° (Δ); 45° (◇); 60° (□); 170° (x) (начало)

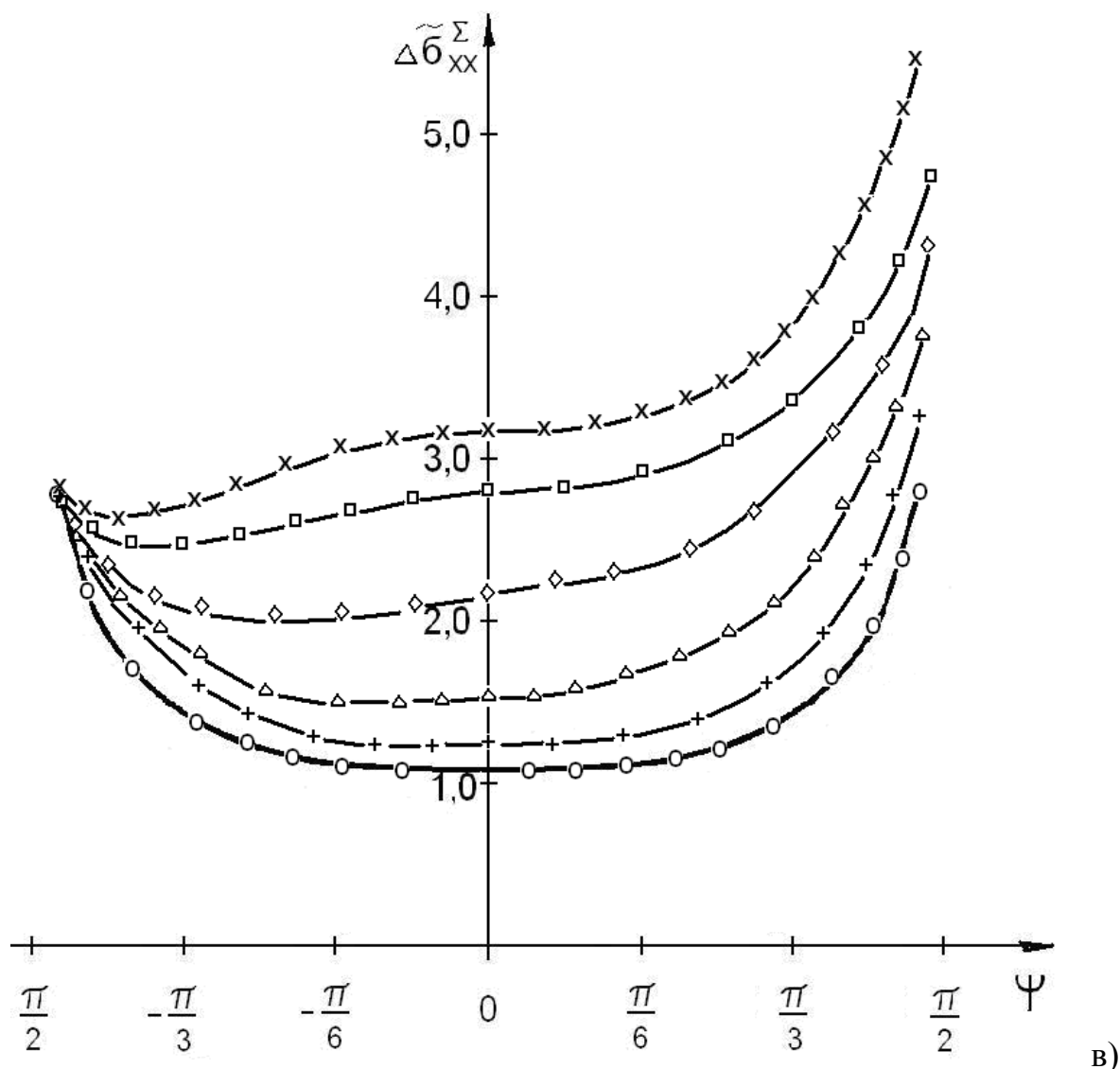


Рис.5. Зависимости от угла ψ избыточных внутренних напряжений: σ_{yy} (а), σ_{xy} (б), σ_{xx} (в) для $\varphi=10^\circ$ (○); 20° (+); 30° (Δ); 45° (◇); 60° (□); 170° (x) (окончание)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны математическая модель, методика моделирования и программное обеспечение для исследований процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью при строгом учете тонкой структуры внутренних полей напряжений.

2. Проведен анализ влияния параметров моделирования на характеристики полей внутренних напряжений, создаваемых дислокационными скоплениями. Путем сравнения результатов

моделирования с известными аналитическими данными определены оптимальные параметры моделирования.

3. На основе разработанных моделей и методик моделирования проведено исследование процессов взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью. Всесторонне изучены характеристики полей внутренних напряжений в приповерхностной области и их зависимости от пространственно-ориентационных параметров системы.

4. Проведен анализ влияния неровностей свободной поверхности на характеристики полей внутренних напряжений в приповерхностных областях. Установлены зависимости величин избыточных внутренних напряжений от параметров поверхностных ступенек.

5. Впервые, при строгом учете тонкой структуры полей внутренних напряжений, проведено моделирование процесса взаимодействия дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки. Всесторонне изучены характеристики рассматриваемого процесса и их зависимости от пространственно-ориентационных параметров системы. Показано, что взаимодействие дислокационных скоплений со свободной поверхностью содержащей ступеньки, обуславливает возникновение областей с повышенной концентрацией внутренних напряжений, которые могут служить источником образования микротрещин.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Чжо Тун, Семикин С.А. Нахождение стационарных конфигураций дислокационных скоплений у свободной поверхности // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2008. Т. 2. С. 8-12.
2. Чжо Тун, Семикин С.А. Расчет и анализ полей внутренних напряжений, создаваемых заторможенными дислокационными скоплениями // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2008. Т. 2. С. 50-54.
3. Логинов Б.М., Чжо Тун. Моделирование полей напряжений, создаваемых ступеньками на свободной поверхности // Труды МГТУ. 2008. Т. 596. С. 99-105.
4. Программный комплекс для исследований взаимодействия свободной поверхности с дислокационными скоплениями / Чжо Тун [и др.] // Научно-технические технологии. 2009. №5. С. 3-7.

5. Чжо Тун, Говоров Д.С. Исследование влияния характеристик дислокационных скоплений на напряженное состояние свободной поверхности // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. Т.2. С. 115-118.
6. Чжо Тун, Говоров Д.С. Исследование точности результатов моделирования напряженного состояния свободной поверхности со ступенькой // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. Т.2. С. 103-108.
7. Чжо Тун, Говоров Д.С. Анализ влияния параметров ступеньки свободной поверхности на характеристики напряженно-деформационного состояния // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. Т.2. С. 109-114.
8. Чжо Тун. Зависимость уровня приповерхностного избыточного напряжения от угла сопряжения дислокационных скоплений // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. М., 2010. Т.1. С. 189-193.
9. Чжо Тун. Разработка модели взаимодействия дислокационных скоплений с поверхностью содержащей ступеньки // Научные технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. М., 2010. Т.1. С. 186-188.

Чжо Тун

Моделирование взаимодействия дислокационных
скоплений со свободной поверхностью

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 26.04.2011г. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 024-80-11.

Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
Калужский филиал
248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2.