ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Гуткина Михаила Юрьевича на диссертацию Сергеевой Татьяны Сергеевны на тему «Фундаментальные периодические решения двумерной упругости при учете поверхностных и межфазных напряжений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Т.С. Сергеевой посвящена получению и исследованию аналитических решений плоских задач изотропной теории упругости для периодических рядов краевых дислокаций и сосредоточенных сил, расположенных у плоской поверхности упругого полупространства и у плоской границы раздела двух полупространств с разными упругими модулями, с учетом поверхностных и межфазных напряжений.

Актуальность темы диссертации. Тема диссертации безусловно актуальна. С одной стороны, в настоящее время учет поверхностных и межфазных напряжений в задачах теории упругости представляет собой одно из основных направлений развития этой теории. В значительной мере это связано с разработкой новых перспективных наноразмерных и наноструктурных материалов, в которых большую долю атомов составляют атомы, расположенные на внешних и внутренних границах раздела. Поэтому роль этих границ часто оказывается определяющей в формировании дефектной структуры и свойств таких материалов. С другой стороны, образование в таких материалах дефектов, и особенно дислокаций, напрямую связано с наличием большого числа границ раздела, которые часто становятся одновременно источниками дефектов и причиной их появления. Разработка теоретических моделей, описывающих механизмы формирования и поведение дефектных структур вблизи границ раздела невозможно без знания особенностей их взаимодействия с этими границами и, в частности, без решения соответствующих граничных задач теории упругости. Решению подобных задач и посвящена работа Т.С. Сергеевой, что и определяет ее актуальность.

Новизна полученных результатов. Новизна полученных в диссертации Т.С. Сергеевой результатов совершенно очевидна. До сих пор подобные задачи решались для отдельных сосредоточенных сил и дислокаций. В данной работе впервые даны решения для их периодических рядов и исследовано влияние периода дислокационного ряда на особенности его упругих полей и сил взаимодействия с внешней границей упругого полупространства и с межфазной границей между двумя полупространствами с разными упругими модулями.

Достоверность полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Она обусловлена корректной постановкой задач плоской изотропной теории упругости с поверхностными и межфазными напряжениями, хорошо апробированным математическим аппаратом их решения с помощью комплексных потенциалов и рядов Фурье, численным исследованием полученных аналитических решений с помощью стандартного программного обеспечения, а также совпадением в ряде предельных случаев результатов численных расчетов с известными результатами других авторов, полученными для отдельных дислокаций и сосредоточенных сил.

Научная и практическая значимость диссертационной работы высока. Т.С. Сергеевой удалось получить новые данные об особенностях распределения полей

напряжений от периодических рядов краевых дислокаций и сосредоточенных сил вблизи внешних и внутренних границ раздела с учетом соответственно поверхностных и межфазных напряжений и о влиянии этих напряжений на силы взаимодействия дислокаций с этими границами. Это позволяет в дальнейшем исследовать роль коллективных эффектов как в процессах образования подобных дефектных структур, так и в их поведении под действием различных внешних факторов. Разработанная методическая схема поиска подобных аналитических решений может быть в перспективе использована для изучения упругого поведения периодических распределений других типов дефектов, например, клиновых дисклинаций, дилатационных нитей, включений, границ зерен и т. д. Представляется, что проделанная автором работа открывает новые подходы для теоретического изучения напряженно-деформированного состояния разнообразных наноразмерных и наноструктурных материалов с учетом их реальной дефектной структуры в рамках теории упругости с поверхностными и межфазными напряжениями.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, приложения, заключения и списка литературы.

Во введении обосновываются актуальность темы исследования, новизна полученных результатов, их достоверность, научная и практическая значимость, а также формулируются основные научные положения, выносимые на защиту. Здесь же приводится краткий обзор литературы по тематике работы.

В первой главе диссертации излагается решение плоской граничной задачи изотропной теории упругости о бесконечном периодическом ряде краевых дислокаций или сосредоточенных сил, расположенном у поверхности упругого полупространства с учетом поверхностных напряжений. Полученное аналитическое решение такой задачи иллюстрируется построенными численно распределениями разных компонент тензора напряжений на поверхности полупространства и в тонком слое наноскопической толщины между дислокациями и этой поверхностью. Исследуется также рассчитанная с помощью этого решения сила притяжения дислокаций к свободной поверхности полупространства.

Во второй главе приводится решение плоской граничной задачи изотропной теории упругости о таком же бесконечном периодическом ряде краевых дислокаций, расположенном у плоской межфазной границы между двумя упругими полупространствами с разными упругими модулями с учетом межфазных напряжений. Как и в предыдущей главе, полученные аналитические выражения для полей напряжений дислокационного ряда и силы взаимодействия дислокаций с межфазной границей изучаются с помощью графиков, построенных численно для разных значений отношения модулей сдвига контактирующих материалов.

В третьей главе дано решение аналогичной задачи для периодического ряда сосредоточенных сил у межфазной границы.

В четвертой главе проводится сравнение между решениями, полученными для периодического дислокационного ряда, расположенного у свободной поверхности упругого полупространства, в рамках разных версий модели поверхностных напряжений Гертина-Мердока. На основе построенных численно графиков распределения напряжений

на поверхности тела Т.С. Сергеева приходит к важному заключению, что ни одна из упрощенных версий этой модели не может заменить полную модель.

Замечания и вопросы по работе

1. Обзор работ по теме диссертации занимает в работе 10 страниц и представляется избыточно лаконичным и несколько формальным. В нем не хватает обсуждения полученных ранее результатов с явной демонстрацией тех преимуществ, которые дает учет поверхностных и межфазных напряжений в граничных задачах теории упругости. Из значимых качественных результатов отмечен только размерный эффект, к которому, однако, приводят и другие версии теории упругости, включающие дополнительные материальные константы с размерностью длины. Ощущается также нехватка иллюстративного материала, полученного расчетным путем, а также четко сформулированных выводов.

2. Используемая автором система цитирования литературных источников неудобна для чтения. Было бы гораздо лучше придерживаться стандартной системы нумерации ссылок в порядке их появления в тексте.

3. Хотя в целом диссертация написана хорошим русским языком, в ней часто встречаются опечатки и ошибки в пунктуации – избыток или нехватка запятых. Кроме того, автор иногда использует неудачные выражения, в частности, нестандартную терминологию, представляющую собой кальку с английского. Например, в русскоязычной терминологии, принятой в теории дислокаций, отсутствуют такие понятия как «сила скольжения» и «сила переползания» (стр. 40), «дислокации скольжения и переползания» (стр. 68). Странно выглядит использование некоторых слов, например:

   – «нормализованное» вместо обычного «приведенное», что дает, например такую неудачную конструкцию как «нормализованное нормальное напряжение» (стр. 39);

   – «усилие» вместо «напряжение» (стр. 50-51), когда из контекста понятно, что речь идет именно о напряжениях;

   – «окружное напряжение» применительно к плоской геометрии задачи (по всему тексту);

   – «главный (иногда – основной) материал» и «второстепенный материал» применительно к материалам, содержащим и не содержащим дислокации (стр. 62 и далее по тексту).

4. Некоторые численные значения параметров задачи берутся с неоправданно высокой точностью, например, упругие константы алюминия – постоянная Ламе 58.17 ГПа и модуль сдвига 26.13 ГПа (стр. 32), или расстояние между дислокациями и границей h = 0.15288 нм (стр. 39). Заметим, что табличные значения упругих модулей для металлов обычно приводятся с точностью до единиц ГПа, а приведенное значение h составляет примерно половину межатомного расстояния в алюминии.

5. В первом слагаемом выражения (1.33) для силы взаимодействия дислокаций с поверхностью ошибочно поставлен синус вместо косинуса. Следует ли считать построенные с помощью этого выражения графики на рис. 1.10 и 2.9 также

ошибочными или они строились по правильной формуле (с косинусом)? Если справедливо второе, то как можно объяснить минимумы при $\varphi \approx 0.35\pi$?

6. В решении задачи о дислокациях вблизи плоского интерфейса (гл. 2) странно появление силы, выталкивающей дислокации в более жесткий материал при относительно малых значениях угла φ (кривые 1 и 2 на нижних графиках на рис. 2.9). Не может ли этот эффект быть следствием ошибки в формуле (1.33), см. замечание 5? Приведенные здесь "классические" решения получены автором или взяты из других работ?

Сделанные замечания касаются в основном стилистики изложения результатов работы, а обнаруженная ошибка в формуле (1.33) носит локальный характер и дает неправильные результаты только для сил, действующих на дислокации, которые имеют составляющую вектора Бюргерса, параллельную внешней или внутренней границе раздела. Она никак не затрагивает сами решения рассмотренных граничных задач и те результаты, которые касаются распределения упругих полей. Таким образом, эти замечания никак не касаются основных результатов работы и не снижают ее общей высокой оценки. Считаю, что Т.С. Сергеева выполнила отличную и очень полезную работу, которая имеет широкие перспективы дальнейшего развития.

Диссертация Сергеевой Татьяны Сергеевны на тему: «Фундаментальные периодические решения двумерной упругости при учете поверхностных и межфазных напряжений» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Сергеева Татьяна Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, зав. лабораторией
механики наноматериалов и теории дефектов
Института проблем машиноведения РАН Гуткин Михаил Юрьевич

02.05.2023

Подпись Гуткина М.Ю.
УДОСТОВЕРЯЮ: Помощник директора
ИПМАШРАН
02 мая 2023 г.