

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)



Б.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

Исх.№

Утверждаю:



Директор
д.ф.-м.н., профессор
А. К. Беляев
2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Александры Борисовны Вакаевой «Исследование почти круговых дефектов в твердом теле на макро- и наномасштабном уровне», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа А. Б. Вакаевой посвящена разработке аналитических методов решения задач плоской теории упругости для цилиндрических полостей и упругих неоднородностей (включений), имеющих поперечное сечение, близкое к круговому. В случае макроскопических размеров таких дефектов автор использует классическую линейную теорию упругости, в случае наноскопических – теорию упругости Гертина-Мердока, учитывающую поверхностные и межфазные напряжения. Решения ищутся с помощью комплексных потенциалов с применением метода возмущений границы дефекта. При этом в нулевом приближении автор получает известные решения для круглого сечения дефектов, а уже первое приближение дает достаточно точные новые решения для рассмотренных поперечных сечений, близких к круговым. Полученные аналитические решения исследуются далее численно для случая одноосного однородного растягивающего напряжения, приложенного вдали от дефекта. Результаты представлены в виде эпюр напряжений на границах дефектов и зависимостей коэффициента концентрации напряжений от радиуса базовой круговой границы дефекта для разных видов и величин отклонений границы от круговой, а также для разных значений отношения модулей сдвига включения и матрицы и разных упругих модулей границы. В случае макро- и наноразмерных полостей результаты численных расчетов, проведенных с использованием найденных приближенных аналитических решений, сопоставлялись с результатами собственных конечно-элементных расчетов, выполненных в среде ANSYS, что позволило автору убедиться в корректности своих результатов и оценить их точность. На основе анализа полученных результатов в работе сделаны важные и полезные выводы о влиянии малых отклонений границы от круговой формы, а также поверхностных и межфазных напряжений на распределение и концентрацию напряжений на границах полостей и включений в условиях плоской деформации. В частности, большое значение имеет вывод о том, что независимо от формы и размера границы заполнение полости любой упругой средой снижает концентрацию растягивающих напряжений в матрице.

Актуальность темы представленной работы не вызывает сомнений. Большинство современных конструкционных и функциональных материалов упруго неоднородны, причем для многих из них типичны вытянутые полости или включения, близкие по форме к цилиндрическим. Примером могут служить такие высокопористые материалы как фотонные кристаллы с регулярной однонаправленной упаковкой цилиндрических полостей, объемные монокристаллы карбида кремния и нитрида галлия с нерегулярным распределением соответственно микро- и нанотрубок, природные иерархические композиты типа дентина зубов человека с однонаправленной упаковкой дентинных канальцев, а также спеченные керамики с хаотичной сетью пор, вытянутых вдоль тройных стыков границ зерен. Типичными представителями неоднородных материалов с вытянутыми включениями являются целые классы волокнистых композитов с металлической, полимерной и керамической матрицами, в которых различным образом распределены волокна разного масштабного уровня, диаметром от сотен микрон до нескольких нанометров. От особенностей напряженно-деформированного состояния приповерхностных и приграничных слоев материала в таких неоднородных системах во многом зависят их прочностные и физико-химические свойства. Развитие процессов пластической деформации и разрушения в этих областях в большой степени определяет механическое поведение материала в целом и вызывает поэтому огромный интерес. С другой стороны, традиционное рассмотрение наноразмерных полостей и включений в рамках классической линейной теории упругости может приводить к неточностям в определении уровней действующих деформаций и напряжений и к неправильным зависимостям этих характеристик от параметров системы. Для преодоления этих трудностей в последние годы широко применяется теория упругости, учитывающая поверхностные и межфазные напряжения. Такой подход показал свою эффективность при решении широкого круга задач, включающих задачи о включениях, неоднородностях, дислокациях и дисклиникациях у свободных и межфазных границ и т. д. В представленной работе учитываются как возможные отклонения границ полостей и включений от правильной цилиндрической формы, так и возможные наноскопические размеры этих дефектов. Корректный учет обоих этих обстоятельств при решении упругих задач безусловно актуален.

Научная новизна представленных автором результатов очевидна. Впервые в рамках двух версий теории упругости, классической и поверхностной, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения, решены плоские граничные задачи о напряженно-деформированном состоянии для цилиндрических полостей и включений с поперечным сечением, близким к круговому. При этом разработан новый метод приближенного аналитического решения этих задач – метод возмущений границы таких дефектов, который дает решение в любом приближении, позволяя оценивать влияние отклонений формы сечения дефекта от кругового на напряженно-деформированное состояние вблизи дефекта. Анализ полученных решений позволил выявить ряд новых особенностей в распределении напряжений на поверхности полости и на границе включения. В рамках теории упругости, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения, для рассмотренных дефектов впервые исследован размерный эффект, отсутствующий в классической линейной теории упругости, – зависимость напряжений на границе дефектов от их размера. Впервые также изучено, насколько сильно проявляется этот эффект в зависимости от величины отношения модулей сдвига включения и матрицы и от значений поверхностных и межфазных упругих констант границы дефекта.

Полученные А. Б. Вакаевой **результаты и выводы представляются вполне достоверными**. Об этом свидетельствует корректная постановка решаемых задач, использование для их аналитического решения хорошо апробированных классических методов математической теории упругости, применение в численных расчетах и графических построениях стандартных пакетов MAPLE и ANSYS. Результаты проведенных расчетов не противоречат ни здравому смыслу, ни уже известным решениям, полученным в некоторых частных случаях другими авторами. В частности, существование размерных эффектов, которые выявляются в теории упругости, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения, хорошо известно из других примеров и подтверждается экспериментами.

Научная и практическая значимость работы высока. В первую очередь, это касается разработанного автором метода приближенного аналитического решения плоских задач классической и поверхностной теорий упругости для цилиндрических полостей и включений с поперечным сечением, близким к круговому. Этот метод – метод возмущений границы таких дефектов – имеет большие

перспективы дальнейшего использования при решении подобных задач. В частности, его можно использовать для уточненных расчетов термоупругих напряжений и напряжений решеточного несоответствия в различных нанопористых и нанокомпозитных структурах, которые находят широкое применение в качестве перспективных конструкционных и функциональных материалов. Такие расчеты необходимы как основа для разработки теоретических моделей релаксации напряжений и формирования различных дефектов в таких гетероструктурах. Учет поверхностных и межфазных напряжений в таких моделях приводит к существенной корректировке критических условий начала пластической релаксации вблизи внешних и внутренних границ гетероструктур и, в конечном итоге, к уточнению теоретических прогнозов работоспособности приборов и устройств, построенных на этих гетероструктурах. Кроме того, сделанные автором заключения относительно размерных эффектов и влияния поверхностных и межфазных напряжений на особенности напряженно-деформированного состояния в исследованных системах важны сами по себе, поскольку вносят существенный вклад в развитие теории упругости, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения.

В целом, диссертация А. Б. Вакаевой представляет собой законченное теоретическое исследование, объединенное единым замыслом и построенное логично и естественно. Она написана простым и понятным языком, с минимальным количеством опечаток и синтаксических ошибок.

В то же время, по работе можно сделать ряд **критических замечаний**:

1. Первая глава, посвященная обзору литературы, получилась чрезмерно краткой и откровенно слабой. Удивительно, что автору хватило всего полутора страниц для описания «современного состояния исследований проблемы на макроуровне» (п.1.1) и четырех страниц для оценки ситуации в области «теории поверхностной упругости» (п.1.2). Соответственно п.1.1 содержит лишь 17, а п.1.2 – 33 ссылки на литературные источники. Это при том, что уже в процитированном автором обзоре Дж. Ванга и др. [44], вышедшем в 2011 году, содержатся ссылки на 286 работ, в той или иной мере посвященных влиянию поверхностных и межфазных напряжений на механикуnanoструктурных материалов. Очевидно, что с тех пор появилось большое количество новых публикаций в такой актуальной сегодня области механики. В двух случаях (на стр. 15 и 17) автор ограничивается простым перечислением имен авторов без конкретного цитирования их работ и хотя бы кратких указаний на их достижения. Отметим, что в итоге список работ, посвященных решению граничных задач теории поверхностной упругости, получился далеко не полным. Например, в него не вошли работы китайских и иранских специалистов последних лет, посвященные упруому взаимодействию дислокаций и дисклиниаций с различными неоднородностями.
2. При постановке упругих задач для цилиндрических полостей и включений с поперечным сечением, близким к круговому, одним из основных допущений автора является условие, что малый параметр ε , равный максимальному отклонению границы дефекта от единичной окружности, много меньше единицы (стр. 21, 40, 56). Это условие позволяет использовать метод возмущений границы дефекта и искать решения для комплексных потенциалов в виде разложений в ряды по степеням ε . Странно, что при этом в некоторых примерах, взятых для численных расчетов в п.п. 2.5, 2.6 и 3.7, принимается $\varepsilon = 0.5$, что уж конечно не соответствует условию $\varepsilon \ll 1$. При таком значении ε форму границы полости или включения очень трудно признать «почти круговой» (см. рис. 2.5(b)). Следствием такой небрежности возможно стало появление трудно объяснимых сжимающих напряжений на контуре более жесткого, чем матрица, включения в точках $\theta = 0$ и $\theta = \pi$, и в их окрестности (см. рис. 3.3(b), 3.5(b), 3.7(b) и табл. 3.1, последний столбец, нижняя строка).
3. В п. 3.7.2, посвященном обсуждению данных таблиц 3.1 и 3.2, два последних заключения (стр. 54) противоречат данным этих таблиц.
4. При обсуждении размерного эффекта в нескольких местах диссертации говорится, что с уменьшением размера наноскопической полости или наноскопического включения «максимальные значения окружного напряжения неограниченно возрастают» или убывают (стр. 69, 74, 88). Поскольку размер таких дефектов должен быть ограничен снизу какой-то разумной конечной величиной, большей, по крайней мере, межатомного расстояния, здесь не может идти речь о

неограниченном возрастании или убывании. Вместо этого было бы полезно оценить значения этих напряжений при предельно малом размере дефекта порядка, скажем, 1 нм.

5. К недостаткам оформления диссертации можно отнести нестандартное расположение названий таблиц под самими таблицами (стр. 32, 53, 72); сбой в нумерации таблиц на стр. 53; ненужное дублирование рисунков (рис. 2.1 и 4.1, рис. 3.1 и 5.1) и некоторых формул (например, формулы (3.2), (4.4) и (5.3) повторяют ненумерованные формулы на стр. 20).

Сделанные замечания конечно никак не затрагивают основных результатов диссертации и не снижают ее общей высокой оценки. Работа А. Б. Вакаевой имеет несомненную высокую научную и практическую ценность. Ее результаты могут быть использованы в разработках Санкт-Петербургского государственного университета, Института проблем машиноведения РАН, Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Института физики твердого тела РАН, Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Материал диссертации достаточно полно отражен в опубликованных автором работах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа А. Б. Вакаевой «Исследование почти круговых дефектов в твердом теле на макро- и наномасштабном уровне» удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Александра Борисовна Вакаева, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре лаборатории механики наноматериалов и теории дефектов ФГБУН ИПМаш РАН, протокол № 4 от 24 апреля 2018 года.

Отзыв составил:

Доктор физ.-мат. наук
Гуткин Михаил Юрьевич,

Главный научный сотрудник, зав. лабораторией механики наноматериалов и теории дефектов
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем машиноведения
Российской академии наук

Докторская диссертация защищена
по специальностям 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела,
01.04.07 – Физика твердого тела

Адрес организации:
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., д. 61
Рабочий телефон: +7-812-321-4764
Адрес эл. почты: m.y.gutkin@gmail.com



Чткина И.Ю.
УДОСТОВЕРЯЮ: По мощнику директора
ИПМаша Н.Н. Гоф
Илас
2018г.