

ханическое поведение наноматериала в целом и вызывает поэтому огромный интерес. С другой стороны, традиционное рассмотрение этого вопроса 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, что связано с очевидными ограничениями в применении классической континуальной теории к описанию микро- и нанообъектов. 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 дисклинациях у свободных и межфазных границ и т. д. Представленная работа выполнена в русле этого чрезвычайно актуального направления и содержит три задачи, не исследованные ранее в рамках данного подхода и успешно решенные автором.

Научная новизна представленных автором результатов очевидна. Впервые в рамках теории упругости, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения, решены граничные задачи о напряженно-деформированном состоянии полубесконечного однородного упруго-изотропного тела с плоской и слабо искривленной поверхностью и бесконечного двухфазного упруго-изотропного тела со слабо искривленной межфазной границей. При этом был разработан новый метод аналитического решения таких задач, позволяющий сводить их к однотипным гиперсингулярным интегральным уравнениям. В случае плоской поверхности твердого тела, находящейся под действием произвольной периодической поверхностной нагрузки, автором впервые получено точное решение задачи; в случае слабо искривленных поверхности и межфазной границей – приближенное решение соответствующих задач методом возмущений. В последних двух случаях использовался оригинальный алгоритм, позволяющий анализировать решение в любом приближении и при периодическом рельефе поверхности или межфазной границы – находить точное решение полученного гиперсингулярного интегрального уравнения. Анализ полученных решений позволил выявить ряд новых размерных эффектов и особенностей в распределении напряжений на поверхности тела и на межфазной границе двухфазного композита.

Полученные Ю. И. Викулиной **результаты** и сделанные ею **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 стандартного пакета “MAPLE”. Результаты проведенных расчетов не противоречат ни здравому смыслу, ни уже известным решениям других авторов, использующих тот же подход для решения аналогичных задач. В частности, существование размерных эффектов, которые выявляются в теории упругости, учитывающей поверхностные и межфазные напряжения, хорошо известно и подтверждается экспериментами. Наблюдаемое автором усиление размерных эффектов по мере повышения градиента нагрузки и увеличения степени неоднородности среды хорошо согласуется с данными других исследователей.

Научная значимость работы высока. В первую очередь, это касается методических разработок автора, позволяющих сводить плоские граничные задачи теории упругости с поверхностными и межфазными напряжениями к решению однотипных гиперсингулярных интегральных уравнений, допускающих в ряде значимых для теории и приложений случаев точные аналитические решения. Предложенный автором метод имеет большие перспективы дальнейшего использования при решении подобных задач. В частности, его можно использовать для уточненных расчетов напряжений несоответствия в различных плоских и цилиндрических нанокompозитных структурах, которые находят широкое при-

менение в современной оптоэлектронике. Такие расчеты необходимы как основа для разработки теоретических моделей релаксации напряжений несоответствия 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.

Поскольку многие современные гетероструктуры содержат периодические рельефные межфазные границы, полученные в работе Ю. И. Викулиной результаты относительно влияния нанорельефа внешней поверхности и межфазной границы на напряженно-деформированное состояние тела имеют большое **практическое значение**. Эти результаты могут найти применение при разработке новых конструкций и технологий создания полупроводниковых приборных нанослойных структур и термозащитных покрытий.

В целом, данная диссертация 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. В работе отсутствует специальная глава, посвященная обзору литературы. Краткий обзор, который приведен во введении, дополняется комментариями и ссылками, разбросанными по всему тексту работы. Для кандидатской диссертации, в которой содержание всех трех глав тесно связано в единое целое, такое построение обзорной части представляется неудачным. Кроме того, список работ, посвященных решению граничных задач теории упругости с учетом поверхностных и межфазных напряжений, получился далеко не полным. Например, в него не вошли работы китайских специалистов последних лет, посвященные упругому взаимодействию дислокаций с неоднородностями.
2. При анализе распределения напряжений в примере, приведенном в главе 1 (см. рис. 1.4 и 1.5, стр. 33–35), выбран чрезвычайно малый период приложенной поверхностной нагрузки – 1 нм. Поскольку речь идет об алюминии, в котором кратчайшее межатомное расстояние составляет примерно 0.3 нм, на такой период приходится всего 3 атома. При этом наиболее интересные особенности графиков напряжений уместаются на отрезке порядка полупериода, то есть примерно на одном межатомном расстоянии. На таком масштабе понятие обычных напряжений просто теряет смысл, хотя графически влияние поверхностного напряжения иллюстрируется, конечно, гораздо ярче. Было бы все же разумнее не гнаться за наглядностью и увеличить период приложенной нагрузки раз в 5, что автор и делает в следующих главах для периода рельефа поверхности и межфазной границы.
3. Распределение напряжений исследовано только на границе полупространства (гл. 1 и 2) и на межфазной поверхности (гл. 3). Их поля в приграничных областях остались

неизученными. Между тем, имея в руках готовые аналитические решения, было бы естественно и очень интересно посмотреть, как сказывается учет поверхностных и межфазных напряжений при разных упругих характеристиках поверхности и межфазной границы на упругих полях в окрестностях рельефных поверхности и межфазной границы. Как показывают данные других авторов, здесь возможны новые, неизвестные пока особенности в распределении напряжений.

4. Последний вывод в Заключение (см. стр. 78) представляется странным: получается, что если рассматривать не периодическую, а локализованную нагрузку, и не периодический рельеф, а только отдельную впадину или выпуклость, то влияние поверхностных и межфазных напряжений можно не учитывать? Поскольку речь идет не об осредненных, а об обычных локальных напряжениях, такой вывод требует пояснений.

Сделанные замечания конечно никак не затрагивают основных результатов диссертации и не снижают ее общей высокой оценки. Работа Ю. И. Викулиной 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 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 Ю. И. Викулиной «Эффект поверхностных и межфазных напряжений в деформируемом теле с плоской и рельефной поверхностью» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.04 – «механика деформируемого твердого тела», а ее автор, Ю. И. Викулина, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Главный научный сотрудник
лаборатории механики наноматериалов
и теории дефектов ИПМаш РАН,
доктор физ.-мат. наук

М. Ю. Гуткин