

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Прониной Юлии Григорьевны на диссертацию Шувалова Глеба Михайловича на тему: «Влияние поверхностных напряжений на образование топологических дефектов в слоистых структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела.

**Актуальность темы диссертации.** Исследования механического поведения слоистых материалов ведутся уже давно в виду их широкого использования на практике. Технологический прогресс дал возможность изготовления материалов не только с микро-, но и наноразмерными элементами структуры – в том числе и слоистых материалов – которые оказались востребованными в различных областях человеческой деятельности от машиностроения до медицины. По сравнению с макромасштабными материалами, в наноструктурных материалах поверхностные эффекты (которые до сих пор не изучены в полной мере) оказывают более существенное влияние на их функциональные свойства. Один из процессов, ведущих к формированию дефектов в наноструктурных материалах, связан с морфологической неустойчивостью межфазных поверхностей вследствие процессов самодиффузии, локализованных в приповерхностных слоях. Перемещение атомов вдоль поверхности приводит к образованию наноразмерного рельефа, который в дальнейшем, при определенных условиях, может эволюционировать в острые трещинообразные впадины, что в конечном счете может привести к разрушению материала. В то же время, при должном контроле данный феномен может быть использован для производства поверхностных наноструктур с требуемыми свойствами. Представленная работа как раз и посвящена исследованию морфологической устойчивости рельефа межфазных поверхностей вследствие процессов самодиффузии с учетом нано-масштабных эффектов, которые в данном контексте не учитывались ранее.

**Новизна полученных результатов** заключается в разработке новых математических моделей слоистых материалов (в рамках плоской задачи теории упругости), учитывающих самодиффузию атомов вдоль межфазных поверхностей, обусловленную неравномерным распределением поверхностных и объемных напряжений, а также упругие свойства границ раздела фаз, для анализа морфологической устойчивости межфазных поверхностей. С использованием данных моделей получены новые зависимости скоростей изменения амплитуды синусоидального рельефа поверхностей от различных параметров исследуемых систем.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением известных апробированных подходов и методов к решению поставленных задач, подтверждается здравым смыслом и согласованием авторских результатов, полученных на основе различных гипотез, между собой, а также сведением разработанных моделей – при определенных предельных переходах – к известным моделям других авторов.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** Разработанные новые математические модели изменения рельефа межфазных поверхностей слоистых композитов, учитывающие диффузионные процессы, поверхностные напряжения и упругие свойства границы, носят фундаментальный характер для теории упругости. Полученные в работе результаты целесообразно учитывать при разработке новых материалов и технологий создания устройств, содержащих наноразмерные элементы, где

микрорельеф поверхности играет важную роль; в частности, они могут найти применение в электронной промышленности, оптике, медицине и др.

**Оценка содержания и оформления диссертации.** Работа объемом 108 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 148 наименований, 22 рисунков и 11 таблиц.

*Во введении* приводится краткая характеристика работы, описываются цель и задачи исследования, а также современное состояние исследований по тематике работы.

В четырех главах диссертации представлены четыре класса моделей слоистых структур, построенные в рамках плоской задачи теории упругости. Каждая из моделей учитывает диффузионный поток атомов вдоль внутренних и/или внешних поверхностей раздела фаз (без смешивания фаз), который считается пропорциональным градиенту химического потенциала, зависящему от поля объемных и поверхностных напряжений. Стремление системы к установлению термодинамического равновесия может привести к росту амплитуды изначально слабо выраженного периодического рельефа поверхности. Условия роста амплитуды рельефа и изучаются в данной работе. Напряженное состояние тела вблизи искривленных границ определялось методом возмущений.

*В первой главе* исследуется морфологическая устойчивость слабо искривлённой свободной поверхности многослойного плёночного покрытия на упругой подложке. Преимуществом разработанной модели является учет поверхностного напряжения, что позволило исследовать влияние знака продольных усилий на критическое значение длины волны рельефа поверхности, при превышении которого происходит рост его амплитуды. При этом исследовано изменение эффекта знака напряжений в зависимости от толщины и относительной жесткости слоев.

*Во второй главе* исследуется морфологическая устойчивость слабо искривленной поверхности упругой полуплоскости, находящейся в напряженном состоянии, с учетом упругих свойств этой поверхности на основе соотношений поверхностной упругости Гёртина–Мёрдока (в предположении, что поверхностная энергия не зависит от градиента вектора перемещений). Получена явная зависимость изменения амплитуды искривления поверхности твёрдого тела от времени, поверхностных и объемных упругих параметров материала, остаточных поверхностных напряжений и продольных усилий.

*Третья глава* посвящена исследованию морфологической устойчивости слабо искривленной поверхности ультратонкого плёночного покрытия (с толщиной не более 100 нм), лежащего на упругой подложке. Влияние упругих свойств свободной и межфазной поверхностей учитывалось на основе соотношений Гёртина–Мёрдока, аналогичных сформулированным в Главе 2. Получено эволюционное уравнение, описывающее изменение амплитуды рельефа поверхности плёнки со временем.

*В четвертой главе* исследуется морфологическая устойчивость слабо искривленной границы соединения двух материалов под действием продольных усилий. Как и в Главах 2, 3 для учета поверхностных напряжений использовалась модель поверхностной упругости Гёртина–Мёрдока. Получено эволюционное уравнение, описывающее изменение амплитуды возмущения межфазной границы. Интегрирование эволюционного уравнения с учетом найденных выражений для компонент тензоров поверхностных и объемных напряжений позволило найти явную зависимость изменения амплитуды искривления границы соединения двух материалов от времени, упругих параметров объемных фаз и межфазной границы, остаточных межфазных напряжений, продольных усилий и коэффициентов диффузии.

Результаты всех глав диссертации хорошо согласуются между собой. В конце каждой главы сформулированы основные выводы.

В заключении представлены основные результаты работы.

Работа демонстрирует высокую квалификацию автора при проведении аналитических и численных расчетов. Несомненным достоинством работы является получение явных зависимостей изменения амплитуды искривления межфазных границ от физических и геометрических параметров рассматриваемых задач с учетом эффектов поверхностной упругости.

Работа оформлена аккуратно и соответствует требуемым стандартам.

Несмотря на несомненные достоинства работы имеются следующие **замечания, вопросы и пожелания:**

1. Не четко сформулированы условия на бесконечности в поставленных задачах.
2. Описание постановки задачи и хода решения в Главе 1 не лишено недостатков (например, не описаны параметры  $\Omega$  и  $J$ , правила индексации некоторых величин; неизвестная  $G$  записывается как функция то одного, то двух аргументов).
3. На Рис. 1.3, 2.2, 3.2, 4.2 не указаны единицы измерения величины, откладываемой по оси ординат, которая названа «относительной амплитудой», хотя, судя по контексту, на графиках отображается изменение ее скорости.
4. Интересно узнать, какой физической реальности соответствует значение  $M = 60$  Н/м в примере в разделе 2.3.
5. Хотелось бы уточнить, чем обосновано предположение о независимости поверхностной энергии от градиента вектора перемещений.
6. Интересно узнать, исследовался ли эффект знака продольных усилий в задачах, рассмотренных в Главах 2–4.
7. Интересно узнать, в каких диапазонах может изменяться длина волны при формировании рельефа поверхности в конкретных материалах, и какие параметры могут оказывать влияние на ее изменение.
8. Судя по представленным в работе микрофотографиям искривленных поверхностей и другим данным, рельеф межфазных границ можно описывать циклоидами. В дальнейшем рекомендуется провести исследование в рамках такой модели.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация Шувалова Глеба Михайловича на тему: «Влияние поверхностных напряжений на образование топологических дефектов в слоистых структурах» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Шувалов Глеб Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Председатель диссертационного совета  
Доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор Кафедры вычислительных методов  
механики деформируемого тела СПбГУ

25.10.2021



25.10.2021



Прокурова Юлия Григорьевна