

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Волкова Александра Евгеньевича 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.

Диссертация посвящена исследованию влияния поверхностных напряжений на морфологическую устойчивость свободных и межфазных поверхностей в слоистых структурах. В качестве основного процесса, приводящего к образованию неровностей указных поверхностей, рассматривается поверхностная диффузия. Тема диссертации является **актуальной**, поскольку процессы, наблюдаемые в приповерхностных слоях, а также на границах раздела фаз, представляют огромный теоретический и практический интерес в ходе изучения и создания новых материалов и привлекают большое внимание исследователей в России и в мире.

**Фундаментально-научное значение** диссертации состоит в выявлении закономерностей влияния диффузионного массопереноса на формирование поверхностного рельефа, создание моделей эволюции формы поверхности.

**Практическая значимость** работы связана с большими возможностями управлять разнообразными свойствами материалов посредством модификации поверхностных слоев и нанесения тонкомерных покрытий. В диссертации определены критические значения поверхностной шероховатости и выработан ряд рекомендаций по достижению стабильности формы покрытий или, напротив, по формированию заданного рельефа.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 108 страниц. **Во введении** изложена актуальность темы диссертации, современное состояние исследований по тематике работы, цели и задачи работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, достоверность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация, структура, объем работы и список публикаций по теме диссертации. Следует отметить полноту и качество обзора литературных источников, что свидетельствует о хорошем знании автора о данной области научных исследований.

Первая глава является ключевой для диссертации, поскольку в ней сформулированы принципы построения данной модели, формализована проблема исследования эволюции формы свободной поверхности, указаны принципы построения модели и сделаны упрощающие предположения. Эта методика с небольшими изменениями применена также в других главах диссертации для расчета устойчивости рельефа поверхностей для других видов покрытий и для внутренней границы раздела фаз. В первой главе исследована морфологическая устойчивость слабо искривлённой поверхности многослойного плёночного покрытия. Для описания механического поведения поверхности использовались соотношения поверхностной упругости Гёртина-Мёрдока. Получены уравнения эволюции амплитуды шероховатости, для решения которых использованы значения напряжений, полученных методом комплексных потенциалов Гурса – Колосова, и применен метод теории возмущений. При численном

решении задача сведена к интегральным уравнениям Фредгольма и затем к системе алгебраических уравнений. Особенностью разработанной модели является то, что при формулировке краевой задачи и выводе эволюционного уравнения поверхности было принято во внимание поверхностное напряжение, которое в данной работе считали постоянным. Учет поверхностного напряжения позволил исследовать влияние знака продольных усилий на критическое значение длины волны искривления, при превышении которого происходит рост амплитуды рельефа поверхности.

Во второй главе разработана модель морфологической устойчивости наноструктурированной поверхности твёрдого тела под действием продольных усилий. Как и в Главе 1, здесь (а также в Главах 3, 4) эволюция периодического рельефа поверхности рассматривается при условии, что изменяется лишь его амплитуда, а самодиффузия атомов вдоль поверхности обусловлена неравномерным распределением объемных и поверхностных напряжений, зависящих также от кривизны поверхности. Проведен анализ влияния упругих параметров материала, продольных усилий и остаточных поверхностных напряжений на морфологическую устойчивость слабо искривлённой поверхности. Для ряда конкретных примеров определены критические значения длины пространственной волны искривления поверхности, выше которой происходит усиление кривизны.

Третья глава посвящена исследованию морфологической устойчивости поверхности ультратонкого плёночного покрытия. Проанализировано влияние поверхностных и объемных упругих параметров материала, остаточных поверхностных напряжений, продольных усилий и толщины плёночного покрытия на критическое значение длины волны искривления.

В четвертой главе разработана модель морфологической устойчивости наноструктурированной границы соединения двух материалов. Исследовано влияние физических и геометрических параметров задачи (упругих параметров объемных фаз и межфазной границы, продольных усилий и коэффициентов самодиффузии материалов).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

Новизна результатов заключается в учёте поверхностных эффектов при анализе морфологической устойчивости свободных и межфазных поверхностей твёрдых тел и плёночных покрытий. С использованием разработанных моделей получены новые зависимости, описывающие процесс потери морфологической устойчивости под действием поверхностной диффузии. **Достоверность** результатов подтверждается согласованием качественных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными. Результаты могут найти применение при разработке новых конструкций и технологий создания устройств, содержащих наноструктурные элементы, в которых качество поверхности играет немаловажную роль.

**Апробация.** Результаты работы доложены на научных семинарах Кафедры вычислительных методов механики деформируемого твёрдого тела Санкт-Петербургского государственного университета, на ряде международных конференций и опубликованы в ведущих российских и международных журналах, доложены.

**Замечания.** Замечания в основном касаются стиля изложения, неточностей формулировок, недостаточном разъяснении способов получения формул и разъяснения сделанных обозначений.

1. Недостаточно подробно описан смысл последнего слагаемого в формуле (1.9): не хватает четкого объяснения зависимости скорости изменения энергии от кривизны поверхности.
2. Автор формулирует свойство свободной энергии, которая убывает при стремлении системы к термодинамическому равновесию, однако, затем в формуле (1.9) учитывает различные источники изменения внутренней (а не свободной) энергии.
3. Из таблицы 1.5 неясно, какое значение критической длины волны рельефа больше: когда поверхностное напряжение растягивающее или когда оно сжимающее.
4. В работе не даны примеры абсолютных численных значений характерных времен изменения амплитуды шероховатости поверхности.
5. На с. 86 указано, что длина волны, соответствующая максимальной скорости изменения рельефа, имеет значения примерно от 100 до 500 нм. Неясно, насколько эффективно диффузия может обеспечить этот процесс на таких расстояниях.
6. Имеются отдельные опечатки и неточности формулировок.
  - а) в формуле 1.5 на с. 20 пропущен коэффициент  $1/2$ ;
  - б) на с. 23 использован термин "работа" вместо термина "энергия".
  - в) в формуле (1.15) второе слагаемое в правой части записано в неудачных обозначениях: формально оно означает производную одной функции по другой функции;
  - г) не разъяснен термин "метрический коэффициент";
  - д) формулы (1.21), (1.22) выражают не комплексные векторы перемещений и напряжений, как утверждает автор, но скорее вводят новые функции, зависящие от напряжения и пространственной производной перемещения;
  - е) на рис. 1.3 по оси ординат отложены значения скорости изменения логарифма относительной амплитуды, а не сама относительная амплитуда, как утверждается в диссертации; при этом не указаны единицы измерения;

Сделанные замечания не изменяют общую положительную оценку диссертации. 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.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор Кафедры теории упругости  
СПбГУ

Волков Александр Евгеньевич

28.10.2021