

ОТЗЫВ

о диссертации Константина Борисовича Устинова «Механика упругого деформирования систем с покрытиями и промежуточными слоями», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации.

Широкое распространение на практике получили всевозможные слоистые структуры, образованные искусственным или естественным путем в результате адгезии. К ним относятся различные многослойные композиты, применяемые на различных масштабных уровнях во многих отраслях техники, включая электронную и оптическую индустрию. Защитные и декоративные покрытия, а также поверхностные слои, возникшие под воздействием окружающей среды в процессе эксплуатации, относятся к элементам слоистых структур. В связи с особенностями взаимодействия покрытий и тонких межфазных прослоек с основным материалом изучение свойств и адекватное описание механического поведения и взаимодействие этих элементов слоистых структур является чрезвычайно важным. Интенсивное развитие нанотехнологий и использование наноматериалов в опто- и микроэлектронике инициировало создание соответствующих физических и механических моделей тонких нанослоев и нанопокровов, обладающих уникальными свойствами, отличными от свойств аналогичных макроструктур. Одним из таких свойств является существование характерного для наноматериалов остаточного напряжения, которое на макроуровне может возникнуть в покрытии или прослойке лишь при создании каких-либо специальных условий, например, при температурном воздействии или в результате особых технологических приемов.

Несмотря на значительное число работ, посвященных изучению тонких покрытий, их деформации и отслоения от основания, а также моделированию и описанию тонких прослоек при помощи различных вариантов поверхностной упругости, решения соответствующих проблем носят разрозненный характер, еще далеки от завершения и нуждаются в обобщении и более глубоком и всестороннем исследовании. В связи с этим, тема диссертации, в которой разработан аналитический подход к решению задач отслоения тонких покрытий с подробным анализом различных вариантов граничных условий, выявлены основные закономерности отслоения и потери устойчивости отслоившихся пластин, построена теория поверхностной упругости общего вида, является актуальной.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, трех приложений, списка литературы из 234 наименований, 28 рисунков, 2 таблиц и изложена на 344 страницах печатного текста.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснование научных положений и выводов занимает значительное место в работе. Так, утверждение о необходимости учета граничных условий, отличных от условий жесткой заделки, при решении задач отслоения и потери устойчивости покрытий, подтверждается результатами анализа построенных аналитических решений в зависимости от относительной жесткости композита пленка-основание. Рассмотрение различных моделей: модели стрингера и модели балки (пластины) позволило всесторонне и достаточно полно исследовать проблему отслоения. Вполне закономерным представляется построение решений матричной задачи и отдельно двух скалярных задач, результаты которых относительно параметров, характеризующих тип заделки, и параметров разрушения затем сопоставляются на предмет приемлемой точности. Исчерпывающие выводы из этих сопоставлений не вызывают сомнений и безусловно аргументированы. Наличие начальных сжимающих напряжений в пластине при рассмотрении задачи потери устойчивости в результате отслоения имеет под собой веское основание, например, в силу различия коэффициентов теплового расширения покрытия и подложки.

Совершенно естественно, что автор не ограничивается плоской формой расслоения и исследует совместное влияние начальной малой кривизны и податливости подложки, поскольку на практике часто присутствует слабая искривленная форма поверхности основания, например, поверхность цилиндра достаточно большого радиуса. На примере задачи о кантилере атомно-силового микроскопа автор демонстрирует практическое значение проводимого в работе анализа граничных условий контакта с основанием (жесткая заделка, упругая заделка). Аналитический подход подкреплен численным расчетом методом конечных элементов.

Построение обобщенной модели поверхностной упругости, предложенной автором, обосновано уже тем, что эта модель предполагает существование произвольного изменения полей и свойств материалов вблизи поверхности раздела. Как результат, в работе весьма убедительно показано, что, например, прогиб двухслойной пластины, описываемый в рамках предложенного подхода, не может быть описан при помощи традиционной теории поверхностных напряжений. Приведены также веские аргументы в пользу предложенной модели поверхностной упругости на примере шарового включения при сравнении решения для поверхностного слоя конечной толщины, эквивалентного поверхностного слоя, моделируемого системой полученных уравнений, и поверхностного слоя, моделируемого системой уравнений традиционной поверхностной упругости.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность результатов диссертации обусловлена математически выверенными и физически корректными и непротиворечивыми построениями моделей деформирования упругих систем с покрытиями и тонкими прослойками, использованием строгих математических методов, сопоставлением полученных аналитических и численных решений, которые в частных случаях совпадают с известными результатами других авторов.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные автором диссертации и основанные на корректной постановке рассмотренных задач и результатах их решений, являются новыми. Так, всесторонне и досконально исследован вопрос об отслоении покрытия от основания с привлечением одного из вариантов теории пластин. Впервые показано, что в подобных задачах важна не только асимптотика поведения решения вблизи точки отслоения, но и противоположная асимптотика – вдали от этой точки. Нахождение этой асимптотики позволяет получить эффективные граничные условия для эквивалентных пластин, моделирующих участки полосы вне непосредственного контакта с основанием.

Впервые введена в рассмотрение расширенная матрица коэффициентов упругой заделки, и рассчитаны ее коэффициенты для ряда случаев. Путем факторизации матрицы-функции с ненулевым индексом получено обобщение решения однородной задачи Златина-Храпкова об отслоении полосы от полуплоскости на случай различных упругих констант, связанных дополнительным условием. Получено аналитическое решение в двумерной постановке задачи о потере устойчивости отслоившегося покрытия при сжатии от плоской и слабо искривленной поверхности основания и проведен анализ влияния граничных условий, кривизны и податливости основания на параметры отслоения.

Построена новая замкнутая система поверхностной теории упругости, обобщающая традиционные соотношения (Шаттлворса и типа винклеровского слоя) и позволяющая учесть собственные деформации в контактирующих слоях и в межфазном слое. На примере задач об изгибе прямоугольной пластины и о составной сфере, а также задачи Эшелби показаны возможности разработанной теории и недостатки традиционной теории поверхностной упругости.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем.

Наиболее существенными новыми результатами, принадлежащими лично автору диссертации, являются:

1. Разработан подход к решению задач об отслоении покрытий при использовании теории пластин для отслоившихся участков покрытия. Гра-

нические условия получены из решения ряда задач о полосе, контактирующей вдоль части границы с полуплоскостью из другого материала. Путем нахождения асимптотик смещения вдали от вершины интерфейсной трещины, а также путем сравнения скорости высвобождения энергии, посчитанной в задаче о полосе и эквивалентной балочной модели, найдены значения констант для записи эффективных граничных условий.

2. Решение задачи об отслоении полосы от полуплоскости обобщено на случай различных упругих постоянных материалов. Соответствующая матричная задача решена путем факторизации матрицы-функции с ненулевым индексом. Получены аналитические выражения для коэффициентов интенсивности напряжений и скорости высвобождения упругой энергии.

3. Исследованы свойства эффективной упругой заделки для пластины, моделирующей отслоение, с помощью расширенной (3x3) матрицы упругих коэффициентов.

4. В рамках сформулированного подхода рассмотрена задача о потере устойчивости отслоившегося от подложки покрытия, в котором действуют собственные деформации сжатия. Получено выражение для критического сжимающего напряжения. Показано, что отношение критического напряжения при упругой заделке к соответствующему напряжению для жестко защемленной пластины определяется единым безразмерным параметром, который зависит от отношения упругих констант покрытия и подложки и отношения длины отслоения к толщине покрытия.

5. С позиций сформулированного подхода в приближении теории пластин, имеющих малую начальную кривизну, исследовано совместное влияние кривизны и податливости основания на параметры отслоения покрытий. Для покрытия, отслаивающегося от цилиндрической поверхности, посчитаны скорости высвобождения энергии при развитии вытянутого вдоль образующей отслоения, как вдоль образующей, так и в окружном направлении. Показано, что для достаточно мягких подложек существует некоторая критическая ширина отслоения, для которой отслоению становится энергетически выгоднее развиваться вдоль криволинейной границы, чем вдоль прямолинейной.

6. Модель балки с нежесткой заделкой применена для описания работы кантилевера атомно-силового микроскопа. Показано, что влияние упругости контакта кантилевера с массивной частью может быть существенно при интерпретации результатов измерений.

7. Разработан достаточно общий подход к описанию поверхностных явлений, связанных с процессом деформирования внутренней (межфазной) или внешней поверхности. В рамках подхода представлена новая, более общая, чем ранее, замкнутая система уравнений поверхностной (интерфейсной) теории упругости, позволяющая учесть наличие собственных

деформаций. В отличие от традиционных соотношений Шаттлворса в выведенных соотношениях помимо напряжений и деформаций, действующих в плоскости поверхности раздела, входят напряжения и деформации, нормальные к этой плоскости.

8. Предложенная модель поверхностной упругости применена к решению задачи о сферически симметричном деформировании шарового включения в бесконечном теле при наличии внешнего поля и собственных деформаций во включении и промежуточном слое. Дано обобщение аналитического решения задачи Эшелби при учете поверхностной упругости и поверхностных остаточных напряжений.

Замечания по работе.

1. Уравнение (4.2.22), отвечающее модели обобщенной упругой заделки, и уравнения (4.2.28), (4.2.37), отвечающие моделям пластины на упругом основании, могут иметь два решения в диапазоне от 0 до 1, в котором допустимо изменение коэффициента γ_σ . В работе найдено одно решение этих уравнений в промежутке $[0.25, 1]$. По поводу второго решения в пределах от 0 до 0.25 возникает вопрос, существует ли условие, при котором этого второго решения нет, или это условие выполняется автоматически в силу физических свойств задачи.

2. На стр. 157 написано, что зеленая линия на рис. 4.6 соответствует асимптотике (4.2.43) при $\beta \gg 1$. Поскольку на этом рисунке величина β изменяется от 0 до 0.7, то неясно, как можно было провести эту линию.

3. Из вторых равенств в (6.2.13) и равенств (6.2.14) последние являются первичными, т.е. из (6.2.14) следуют вторые равенства в (6.2.13), а не наоборот. Равенства (6.2.14) – это гипотеза, с которой вступают в противоречие рассуждения, приведенные на стр. 296, 297. В силу (6.2.14), в равенствах на стр. 297 следует положить $\sigma^{s0} = 0$, и тогда исчезает различие в упругих модулях в соотношениях Гертвина-Мердока и (6.2.56). Думаю, что остаточные поверхностные напряжения и собственные деформации не обязательно должны быть связаны упругим законом. Иначе невозможно отделить эффект остаточного поверхностного напряжения от эффекта поверхностной упругости.

4. В ряде случаев различные по смыслу термины определяют один и тот же объект. Например, «поверхностный слой» и «приповерхностный слой» (стр. 260). Последний термин подразумевает, что слой примыкает к поверхности. В связи с этим на стр. 253 встречается странная фраза о «контактирующих слоях по обе стороны приповерхностного слоя». Также, «шаровое включение» часто называется «шарообразным включением» (стр. 255, 258 – 264).

5. В работе имеется ряд мелких описок, в основном, грамматического характера.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация составляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Полученные в ней новые и оригинальные результаты представляют большой практический и теоретический интерес и могут служить богатым методическим материалом для научных и инженерно-технических работников, а также в учебном процессе в ВУЗах.

Основное содержание диссертации изложено в 48 работах автора, из которых 13 в изданиях из перечня ВАК, и полно отражено в автореферате. Диссертация написана хорошим языком и на высоком профессиональном уровне.

Считаю, что работа «Механика упругого деформирования систем с покрытиями и промежуточными слоями» отвечает требованиям, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор Константин Борисович Устинов заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук,
профессор

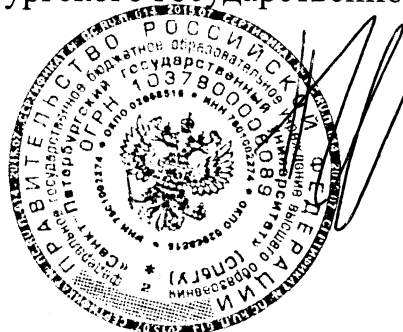
Михаил Александрович Греков

198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 35
С.-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления, профессор
Тел.: (812) 4284492, E-mail: magrekov@mail.ru

10 сентября 2015 г.

Подпись М.А.Грекова удостоверяю.

Декан ф-та прикладной математики–процессов управления
Санкт-Петербургского государственного университета,
профессор



Л.А.Петросян