

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Гандиляна Давида Вагановича

«Применение условий упругой заделки в задачах деформирования тонкостенных конструкций», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность работы. Диссертационная работа посвящена исследованию процессов деформирования, отслоения и разрушения тонкостенных конструкций, элементами которых являются пластины и оболочки, выступающие в качестве покрытия подложки-основания, с учетом их взаимодействия с основанием и с учетом влияния упругих механических характеристик основания на процесс разрушения. Проведенные в диссертационной работе теоретические и вычислительные исследования этого процесса безусловно являются актуальными и имеют практическое значение в современной науке и промышленности.

В условиях развития микро- и нанoeлектроники, энергетической и аэрокосмической промышленности возрастает потребность в создании сверхтонких и высоконадежных покрытий, способных сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии температурных и механических напряжений. Важнейшим аспектом обеспечения долговечности таких систем является исследование и точное моделирование процессов их отслоения и деформирования, возникающие во время эксплуатации. В связи с этим, разработка и применение точных математических моделей с учетом особенностей граничных взаимодействий, таких, как например, обобщенная упругая заделка, позволяют точно учесть взаимодействие покрытия с основанием, что дает возможность предсказывать развитие дефектов, рост и потерю устойчивости отслоившихся участков покрытия, а также разрабатывать более эффективные методы их предотвращения и устранения.

Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций, полученных в диссертации, подтверждаются корректностью

постановок задач моделирования, использованием строгих апробированных математических моделей, основанных на теории пластин и тонких пологих оболочек, а также применением классических теоретических принципов и методов, сравнением полученных результатов с известными решениями и между собой, а также соответствием полученных данных физической картине процессов деформирования тонкостенных элементов конструкций.

Научная новизна работы заключается в развитии математических моделей и получении аналитических решений для исследования напряженно-деформированного состояния тонких покрытий и пластин с учетом влияния подложки-основания. Получены решения задач об отслоении пологих цилиндрических покрытий при условии обобщенной упругой заделки. Проанализировано влияние кривизны, податливости основания и других факторов на процессы отслоения и деформирования. Выявлены новые закономерности в профилях отслоения, такие как эффект “туннелирования” и гофрирования. Также при помощи аналитических и численных методов получено решение задачи о деформировании тонкой упругой круглой пластинки, сопряженной по контуру с массивным основанием, имеющей прикладное значение в системах рентгеновской нанолитографии при производстве микросхем. Здесь также исследовано влияние характеристик основания и других факторов на процессы деформирования пластины.

Практическая значимость результатов. Полученные решения могут быть использованы при создании систем покрытие-основание в различных областях промышленности, в частности в микро- и нанoeлектронике, в процессах фотолитографирования микросхем. Они позволяют спрогнозировать процессы деформирования отслоений, их рост и потерю устойчивости, что способствует повышению надежности, долговечности и безопасности материалов и конструкций.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы

составляет 126 страниц, включает 41 рисунок и 10 таблиц. Список литературы содержит 138 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, а также отмечаются научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Описана используемая методология и методы проведения исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, их достоверность. Также представлена апробация результатов, личный вклад автора, соответствие диссертации требованиям научной специальности.

Первая глава содержит обзор литературы по напряженно-деформированному состоянию покрытий, сопряженных с основанием. Выделены основные проблемы и направления исследований, представлен подход к моделированию напряженно-деформированного состояния покрытий на основе теории тонких оболочек и пластин в условиях обобщенной упругой заделки границы, учитывающей характеристики основания.

Во **второй** главе изложены основные положения математической модели тонких оболочек, приводятся основные уравнения и границы применимости этой модели, в частности приведены соотношения для случая пологих оболочек. Также приведен общий вид граничных условий типа обобщенной упругой заделки.

В **третьей** главе сформулирована и решена задача об отслоении тонкого покрытия от пологого цилиндрического основания в условиях сжимающих напряжений, когда отслоение происходит вдоль осевой координаты. Решение получено на основе теории пологих цилиндрических оболочек с граничными условиями обобщенной упругой заделки. На основе этого решения получены перемещения отслоившегося участка и скорость высвобождения энергии по мере роста отслоения вдоль и поперек оси цилиндра. Проанализированы эти зависимости, а также коэффициент интенсивности напряжений и угол поворота в точке заделки от параметров основания, таких как податливость и кривизна. Одним из результатов является выявление эффекта

“туннелирования”, связанного с критической шириной отслоения, при которой оно прекращает расширяться и распространяется только в осевом направлении.

В четвёртой главе рассмотрена аналогичная задача об отслоении покрытия от пологого цилиндрического основания в случае, когда отслоение происходит по окружной координате. Получены выражения для смещений и скоростей высвобождения энергии при отслоении, исследованы профили отслоившегося слоя, определена роль влияния кривизны и податливости основания. Показано, что при увеличении этих параметров возрастает скорость высвобождения энергии и прогиб (выпучивание) отслоившегося участка. Также показано, что при увеличении кривизны возникает эффект гофрирования, что приводит к локальным экстремумам в зависимостях энергии от ширины отслоения. Здесь также обнаружена возможность существования критического размера ширины отслоения, при котором дальнейшее развитие дефекта происходит за счет удлинения.

В пятой главе решена задача о деформировании сопряженной с упругим основанием круглой пластины под действием равномерной поперечной нагрузки. Контакт с основанием здесь также моделируется через граничные условия обобщенной упругой заделки, что позволяет учитывать различные свойства основания. Здесь используется нелинейная модель Феппля-фон Кармана, учитывающая большие прогибы, но решение получено также для различных других моделей, а именно: для линейной и мембранной теории пластин, для модели Феппля-фон Кармана в предположении постоянства продольных усилий и для полной модели Феппля-фон Кармана в рядах, а также с помощью численного метода, аналогичного методу стрельбы. Для определения коэффициентов податливости в граничных условиях решалась вспомогательная задача методом конечных элементов о полом цилиндра, сопряженном с пластиной из другого материала.

В этой главе исследовано влияние податливости основания и толщины пластины на общие характеристики напряженно-деформированного

состояния. Показано, что при больших прогибах учет податливости основания становится существенным; а также выявлены области применимости различных моделей пластин и методов их решения.

В заключении сформулированы основные положения и выводы на основе полученных результатов.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Полученные в диссертационной работе результаты в достаточной степени апробированы. Они докладывались на всероссийских и международных конференциях, по результатам были опубликованы 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Диссертация соответствует специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела».

Замечания по диссертационной работе:

1. В главе 3 и 4 результаты формулируются в безразмерном виде, при этом вводятся две важнейшие характеристики процесса отслоения: η и k , через которые выражаются все результирующие величины: скорость высвобождения энергии при нарастании дефекта, коэффициент интенсивности напряжений при раскрытии трещины, угол поворота в граничной точке отслоения и величина прогиба в центре отслоения. Эти характеристики η и k определяются через размерных величины: полуширину отслоения и радиус подложки-основания, относительно *“к критической полуширине, соответствующей потере устойчивости отслоения от прямолинейной границы в предположении граничных условий типа жесткой заделки”* (стр. 36), см. формулы (3.24) – (3.26) и (4.24), (4.25). Что это такое и почему оно выражается формулой (3.24) не объясняется. Надо было дать ссылку или непосредственно показать, что эта величина действительно является *“критической полушириной, соответствующей...”*.

2. Из контекста изложения становится понятным, что η является безразмерной величиной, характеризующей степень жесткости заделки, которая как правило больше единицы (“мягкая” заделка), но может принимать значения и меньшие единицы; а величина k характеризует кривизну

подложки-основания, которая может принимать как отрицательные, так и положительные и нулевые значения, хотя была определена через полуширину отслоения и радиус подложки, которые являются неотрицательными величинами. Надо было сразу ввести эти величины как основные безразмерные параметры процесса отслоения и дать подробное описание их физического смысла, а то возникает много вопросов к характеру поведения исследуемых величин. То же самое относится и к безразмерной величине f , которая является силовой характеристикой, изменяющейся в пределах $-1 < f < 0$, и, наверное, лучше было бы перейти к положительной величине $(f + 1)$, тем более, что именно в таком виде она входит в большинство формул, см. (3.30) – (3.32), (4.22), (4.23) и т.д. И тогда был бы более прозрачен смысл систем нелинейных уравнений, определяющих решение, и на рисунках (3.4) – (3.13), (4.3) – (4.8) надписи выглядели бы компактнее, и был бы понятен смысл отрицательной скорости выделения энергии на рисунках 3.4, 4.3 при отрицательной кривизне основания, и прямолинейных участков графика на рисунках 3.4, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11, 4.3, 4.5 при нулевой кривизне, т.е. для плоского основания. Рисунок 3.13, кстати, в тексте нигде не упоминается; на стр. 42 в разделе 3.5 ошибочно указано рис. 3.12 вместо рис. 3.13.

3. Ничего не сказано каким образом решаются нелинейные системы уравнений размерности 3×3 , определяющие решение задачи. Просто идет отсылка к замечательной монографии Галанина, Савенкова [116], в которой излагаются все известные методы численного анализа математических моделей, а в этих нелинейных системах есть нетривиальные нюансы, например, тригонометрические функции разлагаются по малому параметру, и удерживается только первый член этих разложений, см. стр. 37, последний абзац. Надо было метод решения этих нелинейных систем уравнений изложить в диссертации подробнее.

4. В главе 2 идет краткий вывод систем дифференциальных уравнений деформирования тонких оболочек (по монографии Новожилова [12]). Можно согласиться, что этот вывод необходим для общего понимания решаемой в

диссертации проблемы, хотя эти уравнения в их общем виде нигде в дальнейшем и не используются, кроме следующих из них известных формул для тангенциальной и изгибной жесткости цилиндрической оболочки. Однако, в формулах (2.13) и (2.14) допущены ужасные неточности в очевидных соотношениях, сбивающие читателя с толку: в формуле (2.13) надо убрать лишнее ν , а в формуле (2.14) указать правильный знак. Следует отнести эти неточности к досадным опечаткам.

5. В пятой главе в разделе 5.1.3 коэффициенты матрицы упругой заделки оценивались численно на основе решения методом конечных элементов вспомогательной задачи в осесимметричной постановке. Надо было бы указать каким образом получено это решение: оно было реализовано самостоятельно, или использовался какой-то известный конечно-элементный комплекс?

6. При описании метода стрельбы в разделе 5.4 дается своеобразный вывод разностной схемы для системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений фактически второго порядка; в ней вторую производную просто надо заменить известным разностным отношением второго порядка точности. Автор неявно выводит это соотношение на стр. 83, 84, однако, в формуле (5.73) перемещения надо разлагать до второй производной, иначе в формуле (5.76) вторая производная будет аппроксимирована неточно. Проще было бы использовать известное разностное отношение сразу. На самом деле в дальнейшем для решения этой системы дифференциальных уравнений используется классический метод Рунге-Кутты 4-го порядка, что является наиболее грамотным подходом.

Общее заключение. Сделанные замечания не имеют принципиального значения и не снижают научной ценности работы. Представленная к защите диссертация Гандиляна Давида Вагановича «Применение условий упругой заделки в задачах деформирования тонкостенных конструкций» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», посвящена

актуальной теме и выполнена на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют научный и практический интерес.

Считаю, что представленная диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК РФ и критериям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (в редакции от 18.03.2023 года), а ее автор Гандилян Давид Ваганович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела».

Даю согласие на обработку своих персональных данных.

Официальный оппонент

Волков-Богородский Дмитрий Борисович

кандидат физико-математических наук

(специальность 01.01.07 – «Вычислительная математика»),

ведущий научный сотрудник

отдела механики структурированной и гетерогенной среды

ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук»
(ИПРИМ РАН)

Телефон: +7 (909) 659-54-75

e-mail: v-b1957@yandex.ru

адрес: 125040, Москва, пр-т Ленинградский, д.7, стр. 1

Волков-Богородский Д.Б.
«16» мая 2025 г.

Подпись

Волкова-Богородского Дмитрия Борисовича
(фамилия имя отчество оппонента полностью)

удостоверяю



ученый секретарь ИПРИМ РАН
(должность)

Ю.Н. Карнет
(Ф.И.О.)