

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)

В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru



ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001



УТВЕРЖДАЮ

В.А. Полянский

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертационную работу Гандиляна Давида Вагановича
«Применение условий упругой заделки в задачах деформирования
тонкостенных конструкций», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8. -механика деформируемого твердого тела

1. Актуальность темы диссертации

Диссертация Гандиляна Д.В. посвящена исследованиям процессов деформирования тонкостенных элементов конструкций, сопряженных с основанием. Тонкие и сверхтонкие пластины и оболочки в настоящее время являются ключевыми компонентами в микро- и наноэлектронике, солнечной энергии и оптоэлектронике. Это является одной из причин, по которым проблемы деформирования и отслоения тонких покрытий и пленок в процессе эксплуатации различных систем «покрытие-основание» являются предметом интенсивных исследований в механике деформируемого твердого тела.

Традиционный анализ поведения тонкостенных элементов часто основывается на упрощенных моделях с использованием граничных условий жесткого защемления. Однако, реальное взаимодействие тонкого слоя с массивным основанием является более сложным и зависит от механических характеристик обоих материалов. Поэтому важно корректно и с достаточной степенью точности разработать модели, позволяющие исследовать данные эффекты с учетом влияния различных факторов, в том числе влияния основания и геометрии элементов конструкции. Этим обусловлена актуальность работы.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 138 наименований. Общий объем работы составляет 126 страниц, включая 41 рисунок и 10 таблиц.

Во **введении** рассматриваются основные аспекты исследуемой темы диссертации, обосновываются актуальность, цели и задачи работы, научная новизна

и значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту, описывается апробация полученных результатов исследования. Указаны публикации, личный вклад автора, соответствие диссертации требованиям научной специальности и представлена структура работы.

Первая глава посвящена обзору и анализу литературы, описывающей напряженно-деформированное состояние покрытий, которые сопряжены с основанием (подложкой). Описаны экспериментальные и теоретические подходы исследования деформирования покрытий. Выделены ключевые проблемы и определены направления дальнейших исследований. Обозначен общий подход к решению задач, связанных с отслоением и деформированием покрытий, заключающийся в анализе отслоившегося участка с применением теории тонких оболочек и граничных условий типа обобщенной упругой заделки, что позволяет учитывать влияние подложки на процессы отслоения.

Вторая глава посвящена формулировке математической модели для исследования напряженно-деформированного состояния тонких упругих оболочек в рамках гипотезы Кирхгофа – Лява. Изложены основные положения теории, приведены уравнения и границы применения теории тонких оболочек, включая случаи пологих оболочек. Также описан общий вид граничных условий типа обобщенно упругой заделки, с помощью которых учитывается влияние основания.

Третья глава содержит формулировку и решение задачи об отслоении тонкой пленки от цилиндрического основания, возникающего под действием сжимающих напряжений, когда отслоение происходит в осевом направлении. Результаты получены с использованием теории пологих цилиндрических оболочек и граничных условий для обобщенной упругой заделки. Проведен анализ распределений смещений отслоившегося участка и параметра скорости высвобождения энергии при увеличении отслоения по разным направлениям. Представлены зависимости этих величин от относительной податливости подложки и ее кривизны. Показано, что увеличение податливости подложки приводит к росту как величины выпучивания отслоения, так и скорости высвобождения энергии.

Через значения коэффициента интенсивности напряжений (моды I) и угла поворота в точке заделки определен эффект «туннелирования», ограничивающий развитие отслоения за счет расширения. Показано, что параметры цилиндрического основания (кривизна и податливость) определяют существование критической ширины отслоения, при которой отслоению становится выгоднее развиваться вдоль осевой координаты.

В **четвертой** главе анализируется задача об отслоении от пологого цилиндрического основания в окружном направлении. Решение также основано на теории пологих цилиндрических оболочек в условиях плоской деформации с граничными условиями обобщенно упругой заделки. Получены выражения для смещений и скорости высвобождения энергии при отслоении. Изучено влияние величин предварительных сжимающих напряжений, податливости и кривизны основания на скорость высвобождения энергии, угол поворота в точке заделки и форму профиля покрытия. Показано, что увеличение податливости основания и его положительной кривизны вызывает значительное увеличение смещения и скорости высвобождения энергии.

Обнаружено, что при большой кривизне основания в профиле отслоившегося участка может наблюдаться эффект гофрирования, создающий локальные экстремумы зависимости скорости высвобождения энергии от ширины отслоения. Показано, что чем больше кривизна и податливость основания, тем при меньшей ширине наблюдается этот эффект. Также с помощью параметра угла поворота в точке заделки установлено существование критической ширины отслоения, при которой его развитие становится энергетически выгоднее за счет удлинения.

Пятая глава посвящена деформированию круговой пластины под действием равномерной поперечной нагрузки, сопряженной по краю с массивным основанием. Целью данного раздела является оценка влияния упругой заделки на деформацию пластины. Условие взаимодействия пластины и основания моделируется через граничные условия обобщенной упругой заделки, связывающие изгибающий момент и нагрузку в краевой зоне со смещениями и углом поворота с помощью матрицы податливости. В качестве основных соотношений используются соотношения из нелинейной теории пластин Феппля – фон Кармана, с помощью которых можно учитывать достаточно большие прогибы. Значения матрицы податливости в граничных условиях упругой заделки рассчитаны методом конечных элементов с использованием решения вспомогательной задачи.

Решения данной задачи были получены в рамках нескольких теорий, включая линейную теорию пластин, в которой не учитываются мембранные усилия, теорию мембран, где не учитываются изгибающие моменты, теорию Феппля — фон Кармана в предположении постоянства продольных усилий. Помимо указанных упрощенных моделей данная задача была решена в рамках полной модели Феппля — фон Кармана с помощью степенных рядов, а также через численный метод, аналогичный методу стрельбы. Получены выражения для смещений круговой пластины и проведен анализ полученных численных результатов для алюминиевой пластины, сопряженной с кремниевым основанием. Проведено сравнение результатов для различных моделей, с учетом и без учета влияния основания.

Выявлено, что учет податливости основания имеет существенное значение при больших прогибах. При малых поперечных нагрузках все полученные решения близки друг с другом, за исключением решения, полученного в приближении мембранной теории, а при больших нагрузках все решения качественно согласуются, кроме решения, полученного в рамках линейной теории. Также исследовано влияние относительной толщины пластины на ее напряженно-деформированное состояние.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

3. Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов

Научная новизна работы заключается в разработке и применении уточненного подхода к моделированию отслоения тонких покрытий от пологих цилиндрических оснований, заключающийся в использовании нелинейной теории пологих оболочек в сочетании с граничными условиями типа обобщенной упругой заделки.

Получены и исследованы новые решения задач об отслоении тонких пологих цилиндрических покрытий, учитывающие совокупное влияние кривизны и податливости основания. Исследовано совместное воздействие кривизны цилиндрической подложки и ее податливости на ключевые параметры отслоения: скорость высвобождения энергии, коэффициент интенсивности напряжений моды I, угол поворота в точке заделки и компоненты смещения отслоившегося участка.

Показано существование критической ширины отслоения, при достижении которой энергетически выгодным становится развитие отслоения только в одном направлении (эффект "туннелирования"). Показано, что при отслоении в окружном направлении при достаточно большой кривизне может возникать эффект гофрирования.

Получены решения задачи о деформировании тонкой круговой пластины, сопряженной по контуру с основанием, с учетом податливости основания. Реализованы аналитические (на основе упрощенных моделей), полуаналитические (с использованием разложения в ряды) и численные методы решения данной задачи.

4. Оценка практической значимости результатов

Результаты исследований имеют важное практическое значение для повышения надежности и долговечности тонкостенных конструкций в высокотехнологичных отраслях, таких как микро- и нанoeлектроника, авиакосмическая промышленность и машиностроение. Разработанные модели и методы позволяют более точно прогнозировать процессы деформирования, отслоения и разрушения тонких покрытий и пластин, учитывая влияние податливости и кривизны основания, что важно для оптимизации проектирования и условий эксплуатации этих элементов. Полученные количественные оценки и выявленные закономерности могут быть использованы при разработке защитных покрытий, а также в процессах фотолитографии при создании элементов МЭМС.

5. Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций обеспечена: использованием фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела, корректной постановкой задач исследования в рамках нелинейной теории тонких пологих оболочек и пластин, строгим применением соответствующего математического аппарата, построением ряда точных аналитических решений в рамках предложенных моделей, корректностью использования численных и полуаналитических методов, а также согласованностью полученных результатов с физической природой исследуемых процессов.

6. Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе

Диссертация соответствует специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела». Основное содержание диссертационной работы, ее главные результаты в полной мере опубликованы в 5 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из которых 3 в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

7. Замечания и вопросы.

По тексту диссертации имеются следующие вопросы и замечания.

1. При вычислении скорости высвобождения энергии при развитии отслоений (пп. 3.2, 4.2) некоторые члены вычисляются в приближении линейной теории, а некоторые в приближении, учитывающем конечность деформации. Не является ли такой подход непоследовательным и внутренне противоречивым.
2. Не ясен физический смысл параметра b_0 , заданного формулой (3.25) в разделе 3.1 и параметра l_0 , заданного формулой (4.25) в разделе 4.1, использующиеся для обезразмеривания параметров полуширины и радиуса кривизны отслоения.

3. В разделе 3.1 для определения эффекта «туннелирования» (прекращения распространения отслоения) используется критерий равенства нулю коэффициента интенсивности напряжения K_I , характеризующий нормальный отрыв. При этом не учитывается коэффициент интенсивности K_{II} , отвечающий за поперечно-сдвиговой разрыв, хотя возможны случаи, когда K_I равен нулю, а K_{II} не равен нулю, что соответствует, прекращению нормального отрыва отслоения, но продолжению распространения в сдвиговом направлении.
4. В разделе 5.4, где описан численный метод решения задачи используется термин «начальные условия», что может запутать понимание решения задачи, так как он чаще всего используется для решения динамических задач, а в данном случае решается задача в статике. Также в решении указывается на «чувствительность» к начальным условиям при больших значениях нагрузки, хотелось бы подробно расписать в чем заключается этот термин.

8. Заключение по диссертации

Приведенные вопросы и замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертационная работа Гандиляна Давида Вагановича «Применение условий упругой заделки в задачах деформирования тонкостенных конструкций» представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне, и соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертационным работам, соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 года (в редакции от 18.03.2023 года), а её автор, Гандилян Давид Ваганович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твердого тела».

Материалы кандидатской диссертации Гандиляна Д.В. «Применение условий упругой заделки в задачах деформирования тонкостенных конструкций» заслушаны и получили одобрение на семинаре по механике ИПМаш РАН, основанном Д.А. Индейцевым, 31.03.2025 г., протокол №3/25

Отзыв на диссертацию Гандиляна Д.В. заслушан, обсужден и одобрен на заседании лаборатории математических методов механики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем машиноведения Российской академии наук», протокол №28/04/25 от 28.04.2025 г.

Руководитель лаборатории математических методов
механики материалов ИПМаш РАН, д.ф.-м.н


Фрейдин Александр Борисович




Помощник Директора


10.25 г.