

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Устинова Константина Борисовича «Механика упругого деформирования систем с покрытиями и промежуточными слоями», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Работа К.Б. Устинова посвящена разработке подхода к исследованию механического поведения тонких покрытий и промежуточных слоев, выявлению на основе этого подхода основных закономерностей их деформирования и разрушения посредством образования отслоений.

*Актуальность* проблематики, связанной с исследованием механического поведения тонких покрытий и промежуточных слоев, обусловлена широким использованием подобных структур в научных и прикладных исследованиях в технике, медицине, биомеханике, конструировании новых материалов и так далее на разных масштабных уровнях, от макро- до нано-структур. В частности, такие структуры встречаются в композиционных материалах, в геологических породах со складчатыми структурами, в нанорезонаторах, основанных на измерениях частот колебаний графеновых листов на подложках и так далее. По этой причине рецензируемая работа представляется современной и актуальной.

Основной *новый*, полученный *лично* автором, результат диссертационной работы заключается в разработке подхода, позволяющего моделировать механическое поведение покрытий, промежуточных слоев и отслоений, а также установлению закономерностей деформирования, роста отслоений и потери их устойчивости при термомеханическом воздействии на материалы и конструкции. В процессе работы над решением главной проблемы автор решил много частных, но очень важных для теории и приложений задач и, в итоге, получил ряд интересных результатов, среди которых можно выделить следующие, определяющие для оценки работы как докторской диссертации, результаты:

- Разработан подход к решению задач об отслоении покрытий с моделированием отслоившегося участка тонкой пластиной, граничные условия для которой находятся из точного решения задачи о контакте полубесконечного отслоения с основанием.
- Получены новые решения задач о полосе, контактирующей с полуплоскостью из другого материала вдоль части границы.
- Получены уточненные условия упругой заделки, позволяющие моделировать отслоение покрытия от основания с учетом выпучивания отслоившейся части покрытия.
- Выявлены закономерности механического поведения отслоений.
- Разработана уточненная балочная модель кантилевера атомного силового микроскопа, основанная на замене граничного условия жесткой заделки балки на упругую заделку.

- Дано обобщение уравнений поверхностной упругости, позволяющее учитывать начальные напряжения.
- Получено обобщение точного решения задачи Эшелби, учитывающее поверхностные начальные напряжения.

**Значимость** основного результата диссертации – разработки подхода, позволяющего моделировать механическое поведение покрытий, промежуточных слоев и отслоений – состоит в том, что разработанные методики повышают достоверность результатов определения допустимых термомеханических режимов слоистых структур и структур с покрытиями, что, в частности, очень важно для правильной оценки эксплуатационных характеристик деталей пассажирских авиационных лайнеров в связи с широким внедрением в современное авиастроение композитных материалов.

**Ценность** полученных результатов для практики состоит в том, что на стадии проектирования изделий из композиционных материалов, материалов с покрытиями и определения напряженно-деформированного состояния сферических включений в упругой среде разработанные подходы позволяют провести более приближенное к реальности моделирование деформирования этих объектов, что, в конечном итоге, приведет к их повышенным эксплуатационным характеристикам.

**Достоверность** основных выводов и положений диссертации обоснована вследствие:

- применения уравнений механики деформируемого твердого тела;
- строгостью постановки краевых задач и формулировки определяющих соотношений;
- верификацией разработанных подходов путем сравнения полученных решений с известными решениями для тестовых задач;
- получением в тех случаях, когда это возможно, точных решений краевых задач;
- использованием современного надежного метода конечных элементов при численных решениях задач.

Основные результаты диссертации опубликованы. **Автореферат** правильно отражает содержание диссертации.

В качестве **замечаний** можно отметить:

1. В большей части диссертации в формулировках задач с начальными напряжениями (кроме задач о потере устойчивости рассматриваемых структур) используются уравнения равновесия для конечных величин. Однако более точная формулировка задач с начальными напряжениями основывается на инкрементальных уравнениях. В этом случае в уравнениях равновесия появляются дополнительные члены вида (напряжения  $\times$  инкременты градиентов приращений перемещений). Подобные формулировки задач с начальными напряжениями приведены, например, в монографиях  
Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987,  
Biot M.A. Mechanics of Incremental Deformations. New York: Wiley, 1965.

2. Отсутствуют расписанные по пунктам алгоритмы введения уравнений поверхностной упругости с начальными напряжениями в существующие конечно-элементные пакеты прикладных программ, что затрудняет широкое использование разработанных в диссертации алгоритмов в вычислительной практике.
3. В диссертации показано, что учет упругой заделки кантилевера атомного силового микроскопа вносит существенную поправку в определение его прогиба при использовании балочной модели по сравнению со стандартным использованием условия жесткой заделки. Однако еще большее влияние на определение прогиба кантилевера может оказать учет геометрической нелинейности его деформирования вследствие достаточно больших поворотов, которые не учитывает линейная теория упругости.
4. В диссертации приведены результаты численных решений некоторых задач методом конечных элементов, однако нигде не указано с помощью какого пакета прикладных программ получены эти решения.

**Заключение.** Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку квалификационной работы, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения уточненного моделирования механического поведения тонких покрытий и промежуточных слоев, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики деформируемого твердого тела. Диссертационная работа «Механика упругого деформирования систем с покрытиями и промежуточными слоями» представляет собой законченное научное исследование по важнейшей для теории и практики сложной научно-технической проблеме моделирования деформирования, отслоения и потери устойчивости как конструкций из композиционных материалов, так и тонких покрытий массивных деформируемых тел при термомеханических воздействиях.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Устинов Константин Борисович *достоин присуждения* ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Официальный оппонент  
заведующий лабораторией механики разрушения материалов и конструкций  
Федерального государственного учреждения науки  
Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук  
д.ф.-м.н., с.н.с  
17.08.2015 г.

Коробейников Сергей Николаевич

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр-т Акад. Лаврентьева, 15,  
тел. +7(383)3331746,  
e-mail: s.n.korobeynikov@mail.ru

