

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
Аннина Бориса Дмитриевича  
на диссертацию

**Перельмутера Михаила Натановича** на тему

**«Модели и методы расчета процессов разрушения по границам соединения материалов»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 – «механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность темы диссертации и структура работы.** Диссертация Перельмутера М. Н. посвящена разработке моделей и методов расчета процессов развития трещин по границам соединения материалов. Задачи механики разрушения для адгезионных соединений и композиционных материалов являются важным и актуальным направлением в механике деформируемого твердого тела. Детали с тонкими покрытиями и адгезионные соединения тонких слоев различных материалов являются основой современной электроники. Композиционные материалы широко используются в современных аэрокосмических и транспортных конструкциях.

Разрушение вследствие движения трещины по границе слоистого материала может возникать как в результате линейного дефекта соединения, так и при изменении направления движения трещины. В середине семидесятых годов прошлого столетия в работе Л.П. Францужовой, выполненной под руководством Л.И. Слепяна в Институте гидродинамики СО АН СССР, рассматривалась следующая модельная задача (см. Францужова Л.П. Экспериментальное исследование распространения трещин на модели слоистого пластика // Динамика сплошной среды. Сб. науч. тр., Вып. XIX-XX. Изд-во Института гидродинамики СО АН СССР, 1974. С. 141–145). Образцы, состоящие из четырех стеклянных полос, склеенных эпоксидной смолой холодного отверждения, испытывались на изгиб. При определенной величине прогиба образца алмазом производился надрез наружной растянутой полосы. Возникающая при этом трещина проходила через первую полосу и слой смолы. На границе со второй полосой трещина либо тормозилась, либо проникала в следующую полосу. В случае торможения трещины, как правило, наблюдалось отслоение верхней полосы. Из этих экспериментов следовало, что траектория движения трещина естественным образом может проходить по границе слоев.

В диссертации зона разрушения на границе соединения материалов рассматривается как трещина с концевой областью, размер которой не предполагается малым по сравнению с размером трещины. Такой подход важен, в частности, при моделировании процессов разрушения в нанокomпозиционных материалах.

Диссертация изложена на 356 страницах, состоит из введения, пяти глав, приложения и списка литературы из 296 наименований, отражающего современное состояние тематики работы.

Во введении определен предмет исследования диссертации, обоснована актуальность темы, приведен краткий обзор литературы, формулируются цель, задачи и научная новизна исследования.

В главе 1 предложена обобщенная модель трещины со связями в концевой области на границе соединения материалов с учетом сингулярности напряжений в вершине трещины. Автором рассматривается соединение линейно-упругих материалов с различными механическими свойствами. Нелинейные эффекты, связанные с процессом разрушения, предполагаются локализованными в концевой области трещины и описываются с помощью закона деформирования связей. Учет длительности приложения нагрузки рассмотрен на основе термофлуктуационной теории разрушения.

В главе 2 диссертации разработаны методы исследования напряженно-деформированного состояния и расчета коэффициентов интенсивности напряжений для областей с трещинами на границе соединения материалов с учетом взаимодействия берегов трещин, основанные на использовании сингулярных интегро-дифференциальных и граничных интегральных уравнений. Автором получена новая система сингулярных интегро-дифференциальных уравнений для анализа напряженно-деформированного состояния в концевой области прямолинейной трещины, на границе соединения двух полуплоскостей из различных материалов, а также новые интегральные выражения для расчета коэффициентов интенсивности напряжений при учете связей в концевой области трещины, на границе соединения материалов. Разработаны методы численного решения указанных уравнений для случаев линейно-упругих и нелинейных законов деформирования связей в концевой области трещины, с учетом термофлуктуационной кинетики распада связей. Для исследования напряженно-деформированного состояния в областях конечного размера с трещинами на границе соединения материалов, с учетом взаимодействия берегов трещин и условий неидеального контакта между подобластями, разработаны методы и алгоритмы численного решения граничных интегральных уравнений задачи термоупругости. Полученные автором численные результаты подтверждаются в ряде случаев опубликованными расчетными и экспериментальными данными.

В главе 3 диссертации выполнено исследование решения полученной автором системы сингулярных интегро-дифференциальных уравнений, выделены характерные параметры, определяющие изменение решения системы; изучено влияние на решение упругих механических свойств материалов и связей, а также формы кривой деформирования связей между берегами трещины. Методом граничных интегральных уравнений получены и исследованы решения ряда новых задач для областей конечного размера с криволинейными трещинами на границе соединения материалов, с учетом взаимодействия берегов трещин. Исследовано взаимодействие трещин со связями в концевой области с препятствиями и границами раздела сред, включая случаи неидеального соединения материалов при механическом и термическом нагружении.

В главе 4 диссертации предложен вариант нелокального критерия разрушения для анализа предельного равновесия трещин с концевой областью на границе соединения материалов с энергетическим условием продвижения вершины трещины, учитывающим работу по деформированию связей в концевой области трещины, и кинематическим условием разрыва связей на краю концевой области. Выполнено аналитическое исследование применения нелокального критерия разрушения для случая постоянных напряжений в связях. Рассмотрены режимы докритического и квазистатического роста трещин, а также предельные случаи трещины с малой концевой областью и трещины, заполненной связями. Проведено сопоставление с известными критериями разрушения.

В главе 5 диссертации исследовано влияние механических свойств материалов и связей на коэффициенты интенсивности напряжений и энергетические характеристики трещины с концевой областью, а также рассмотрено влияния кинетики связей в концевой области трещины на характеристики трещиностойкости. Изложена, разработанная автором, методика применения нелокального критерия формирования и развития трещин со связями в концевой области. Изучены эффекты упрочнения, вызванные присутствием связей в концевой области трещины, на границе соединения материалов. Получены оценки характеристик адгезионного сопротивления соединений материалов, а также рассмотрено сопоставление с известными численными и экспериментальными результатами.

Расчетные результаты, приведенные в диссертации, получены с использованием разработанного автором комплекса компьютерных программ для решения сингулярных интегродифференциальных и граничных интегральных уравнений с учетом нелинейных законов деформирования связей и кинетики связей в концевой области трещины.

**Степень обоснованность и достоверности научных результатов.** Результаты, приведенные в диссертации, являются обоснованными и достоверными, так как разработанные модели основаны на фундаментальных физико-механических принципах, а математическое описание моделей и разработанные методы исследования напряженно-деформированного состояния основаны на корректном использовании методов механики деформируемого твердого тела, механики разрушения и вычислительной механики. Аналитические и численные результаты, полученные в работе, не противоречат опубликованным аналитическим решениям, асимптотическими оценками, экспериментальными и расчетными данными.

**Наиболее существенные результаты, полученные автором.** Основные новые научные результаты диссертации состоят в следующем:

- 1) разработаны модели концевой области трещины с учетом взаимосвязи нормальной и касательной мод деформирования и кинетики связей, позволяющие исследовать

довать формирование и рост трещин по границам соединения материалов; разработан метод исследования длительного разрушения на основе объединения модели концевой области трещины и термофлуктуационной теории разрыва связей;

2) разработаны методы решения задач механики разрушения для трещин на границе соединения материалов с концевой областью, размер которой не является малым по сравнению с характерным размером трещины;

3) получена и исследована система сингулярных интегро-дифференциальных уравнений для анализа напряженно-деформированного состояния в концевой области трещины, на границе соединения полуплоскостей из различных материалов;

4) разработаны методы, алгоритмы и компьютерные программы, реализующие численное решение сингулярных интегро-дифференциальных и граничных интегральных уравнений; получены в квазистатической постановке решения ряда новых задач механики разрушения для трещин в кусочно-однородных структурах;

5) предложен вариант нелокального критерия квазистатического роста трещин, учитывающий работу по деформированию связей в концевой области трещины; предложен критерий формирования трещин на границе соединения материалов, основанный на анализе кинетики адгезионных связей;

#### **Замечания по диссертации:**

1. Из текста работы неясно, возможно ли рассмотрение в рамках модели концевой области трещины и численного алгоритма метода граничных интегральных уравнений отклонения трещин от границы соединения материалов?

2. В п.3.3.2 рассмотрен пример решения нестационарной задачи термоупругости для пластины, содержащей трещины со связями в концевой области. Учитываются ли изменения свойств связей и материалов при нестационарном тепловом нагружении?

3. В главе 4 рассматривается нелокальный критерий квазистатического роста трещин со связями в концевой области. Допустимы ли в рамках этого критерия различные значения критического раскрытия трещины для деформирования в нормальном и касательном направлениях?

**Соответствие автореферата диссертации.** Автореферат удовлетворяет требованиям ВАК России, правильно и полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04.

**Апробация результатов исследования.** Основное содержание диссертации отражено в 17 публикациях в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в перечень ВАК, а также в ряде сборников статей, препринтах и трудах конференций. Работа бы-

ла апробирована на российских и зарубежных научных конференциях и симпозиумах различного уровня.

Таким образом, диссертация Перельмутера М. Н. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, разработаны теоретические положения и получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Диссертационная работа Перельмутера М. Н. «Модели и методы расчета процессов разрушения по границам соединения материалов» является законченным научным исследованием, соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (в ред. постановления Правительства Российской Федерации от 20 июня 2011 г. № 475) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

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

Советник РАН

академик РАН, доктор физико-математических наук



Аннин Борис Дмитриевич

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

630090, Новосибирск, проспект Лаврентьева, 15

тел. (383) 333-20-51

email: [annin@hydro.nsc.ru](mailto:annin@hydro.nsc.ru)

Подпись академика Б.Д. Аннина

заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН

к.ф.-м.н. 06.10.2015

И.В. Любашевская