

## ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию Перельмутера Михаила Натановича «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.

Диссертация посвящена актуальной проблеме теоретического анализа процесса разрушения составных деформируемых твердых тел (композитов). Речь, в основном, идет о трещинах, распространяющихся вдоль границ соединения (хотя рассмотрен и случай трещины, выходящей на поверхность раздела). Для решения проблемы развивается теория трещин с концевыми частями, берега которых связаны между собой (заполнены связями, являются зонами сцепления).

В отличие от большого количества работ в рамках этой теории, размеры концевых зон в данном исследовании не считаются малыми (возможно рассмотрение ситуации, когда связи заполняют всю трещину). В тексте диссертации необходимость именно такого подхода убедительно обоснована. Дело в том, что область соединения различных частей деформируемого тела является, как правило, ослабленной. Поэтому размер части продолжения трещины на линии соединения материалов, где связи между берегами частично нарушены и взаимодействие никак нельзя считать упругим, как правило, малым по сравнению с длиной трещины не является.

Во многих работах, исследующих трещины с зонами сцепления, в качестве одного из условий используется требование отсутствия сингулярности напряжений в вершине трещины. Вместе с предположением о малости зоны сцепления, это требование ведет к существенному упрощению проблемы, которая становится эквивалентна обычной задаче линейной механики разрушения. Автор диссертации от этого требования также отказывается. В качестве обоснования выдвигается тезис о комплексном характере, многомасштабности зоны сцепления в случае трещины на границе между разнородными материалами. Предложено интересное модельное представление, согласно которому на продолжении линии трещины расположена не одна, а несколько зон сцепления различных масштабов, с различными механизмами и характером связей. Однако все зоны, кроме непосредственно примыкающей к вершине трещины, считаются малыми, автономными, и их наличие может быть учтено в рамках представлений линейной механики разрушения.

Согласно известным решениям задач линейной механики разрушения для трещин, расположенных на границах соединения разнородных материалов, при действии нагрузки, нормальной к плоскости трещины, возникают поля напряжений и смещений смешанного типа (нормального отрыва и поперечного сдвига). Смешанный вид разрушения имеет

место и при действии только касательных напряжений. В силу этого обстоятельства автором диссертации предложено учитывать реакцию связей в концевых зонах не только по нормали к поверхности трещины, но и по касательной, причем каждая из реакций связана с соответствующей компонентой вектора относительного смещения берегов зоны сцепления. Это - еще одна модификация теории трещин с зонами сцепления, которая приспособливает эту теорию к решению задач о трещинах, распространяющихся по границам между разнородными материалами.

Коль скоро развиваемая теория учитывает процессы, происходящие в зоне сцепления, необходимо было построить модели взаимодействия берегов концевой зоны трещины. В диссертации предложено несколько таких моделей. Рассмотрен случай соединения полимеров через специальный промежуточный слой; получен закон деформирования связи, образованной волокнами при их взаимодействии с матрицей композитов, с учетом существующего между ними межфазного слоя; построена модель реономных эффектов в концевой зоне на основе термофлуктуационной теории С.Н. Журкова. В последнем случае, в отличие от известных аналогов, концевая область не считается малой по сравнению с размером трещины. В результате появилась и реализована возможность построить не только модель развития, но и модель зарождения дефектов на межфазной границе. Все эти достаточно сложные модели доведены до конечных формул, связывающих между собой величины относительных смещений берегов зоны связей с напряжениями, действующими в этих связях.

Еще одним достижением автора диссертации является осуществленная постановка сингулярных задач теории упругости для трещин развиваемых по границе соединения разнородных материалов, учитывающая сложные, нелинейные взаимодействия, происходящие в зоне сцепления. Основным достоинством этой постановки является тот факт, что нелинейные взаимодействия моделируются в рамках линейной задачи, вся нелинейность перенесена в смешанные граничные условия сингулярной задачи теории упругости. Разработаны строгие математические методы решения этих задач в том числе, способ решения соответствующих задач для конечных областей, основанный на методе граничных интегральных уравнений. В качестве иллюстрации и для подтверждения сходимости решено большое количество интересных задач. Особо следует отметить приведенные в разделе 2.4 результаты решения задач двумя различными методами. Неплохое соответствие результатов, полученных различными методами, свидетельствует об их достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждена также анализом сходимости решений при сгущении соответствующих сеток.

Учет концевых областей добавляет в проблему разрушения еще одно неизвестное - размер этой концевой области. Для определения этого неизвестного необходимо дополнительное условие. Использовать в качестве дополнительного соотношения условие отсутствия сингулярности в вершине трещины нельзя, поскольку развиваемая модель отсутствия сингулярности не предполагает. Согласно предложениям автора работы, разрушение, происходящее по границе соединения упругих тел может иметь три различных сценария. Может увеличиваться собственно трещина за счет разрушения связей на границе между трещиной и концевой зоной, т.е за счет превращения части концевой зоны собственно в трещину, без движения внешних границ концевой зоны. Может двигаться внешняя граница концевой зоны без изменения размеров собственно трещины. Для осуществления каждого из этих событий автором используется свое условия (силовое и энергетическое). При выполнении обоих этих условий растет собственно трещина и, одновременно, распространяется во внешнем направлении концевая зона. В этом и состоит предлагаемый автором нелокальный критерий развития разрушения, в рамках которого разрушение моделируется не как единовременный акт, как в известных аналогах, а как достаточно сложный процесс.

Предложенный критерий применен для анализа процесса разрушения однородной плоскости. Автору удалось получить аналитическое решение поставленной задачи, которая была сведена к системе двух нелинейных алгебраических уравнений. В рамках этого критерия проведено также численное исследование более сложных процессов разрушения для составных тел. Получен целый ряд новых интересных в качественном отношении результатов.

Замечания по тексту диссертации.

1. Необходимо прокомментировать вопрос о том, как решается проблема с осцилляцией перемещений и налегания берегов трещины или границ концевой зоны в задаче о трещине на границе двух материалов при наличие концевой зоны со связями.
2. При формулировке нелокального критерия разрушения активно используются понятия «Полная энергия тела», «потенциальная энергия деформации связей». Не понятно, что понимается под этими терминами, о каких термодинамических потенциалах идет речь? При наличие достаточно большой концевой зоны, в которой происходят необратимые диссипативные процессы, связанные с температурными эффектами, пользоваться необходимо терминологией, принятой в термодинамике. При формулировке уравнения баланса энергии (4.12) следует учитывать

часть энергии, превращающейся в тепло. Это замечание касается не только данной работы, но и самого энергетического критерия Гриффитса. Тем не менее, какие-то комментарии здесь требуются.

3. В тексте диссертации следовало бы более четко определить, какая область границы между двумя разнородными материалами называется собственно трещиной, какая - концевой зоной, каковы условия переходов от собственно трещины к концевой области трещины, от концевой области к неповрежденному соединению двух материалов. В отсутствии четких определений трудно понять, каким образом может продвигаться трещина без разрыва связей в концевой зоне, или как может происходить разрыв связей в концевой зоне без продвижения трещины.
4. Известно явление докритического подрастания трещины (ее устойчивый рост при монотонно возрастающей нагрузке), наблюдаемое особенно ярко в случае трещины Гриффитса в тонкой пластине. Здесь речь идет о росте реальной трещины, т.е. разреза, берега которого не взаимодействуют. Известно несколько моделей, описывающих это явление. В данной диссертации также есть разделы, посвященные докритическому росту трещины. Однако, насколько можно понять из текста работы, в диссертации речь идет о докритическом росте не собственно трещины, т.е. математического разреза, берега которого никак не взаимодействуют, а концевой области этой трещины, заполненной связями. Собственно трещина не растет. Возникает вопрос о том, может ли развиваемая автором модель описать докритический рост собственно трещины?
5. Решение задачи о распространении трещины по границе соединения материалов и развития ее концевой зоны является достаточно сложной проблемой в силу того, что должна быть решена смешанная сингулярная задача теории упругости с различными типами граничных условий на разных участках границы, причем размеры этих участков заранее не известны и определяются в процессе решения задачи. Хотелось бы понять, каким образом определяются эти размеры. В тексте диссертации приведены лишь два разрешающие уравнения, содержащие две неизвестные величины (размеры трещины и концевой зоны). Однако эти уравнения, кроме этих двух неизвестных параметров, содержат еще функции, которые могут быть найдены лишь при решении интегро-

дифференциальных уравнений задачи, которые сами зависят от искомым величин длины трещины и размера концевой зоны. Хотелось бы иметь более подробные описания процедуры решения этой проблемы.

Сформулированные замечания касаются больше не сути работы, а формы изложения ее результатов, и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация посвящена решению крупной научной проблемы исследования разрушения на границах соединения материалов актуальной, как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. В ней получено много новых интересных результатов. Достоверность обеспечивается полученными аналитическими решениями и сравнением между собой результатов численных решений, найденных различными методами. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает это содержание достаточно полно. Основное содержание диссертации достаточно полно изложено в публикациях ее автора. Работа удовлетворяет требованиям п.п. 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 Перельмутер Михаил Натанович заслуживает присуждения ему 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  
главный научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института прикладной механики  
Российской академии наук  
д.ф.-м.н., профессор  
6.11.2015 г.

 Мовчан Андрей Александрович

Почтовый адрес: 125040, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр.1

Тел. 8(495)946-17-77

e-mail: [movchan47@mail.ru](mailto:movchan47@mail.ru)

Подпись проф. А.А. Мовчана удостоверяю  
Ученый секретарь ФГБУН ИПРИМ РАН

 Ю.Н. Карнет

