

ОТЗЫВ

о диссертации Михаила Натановича Перельмутера «Модели и методы расчета процессов разрушения по границам соединения материалов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации.

На практике широко используются всевозможные слоистые структуры, образованные искусственным или естественным путем в результате адгезии. К ним относятся многослойные композиты, применяемые на различных масштабных уровнях во многих отраслях техники, включая электронную и оптическую индустрию. Наиболее ответственным элементом таких структур является граница соединения материалов. Как при производстве, так и в процессе эксплуатации, чаще всего на таких границах возникают всякого рода дефекты, такие, например, как участки с ослабленными межслойными связями и межфазные трещины. Развитие таких дефектов вдоль соединения материалов может привести к расслоению и, в конечном счете, к потере эксплуатационных свойств элементов конструкций. Ввиду существования промежуточного слоя на границе соединения материалов, наиболее характерной моделью межфазной трещины является трещина со связями, тормозящими её распространение, аналогично трещине в композите, армированном волокнами. В связи с этим тема диссертации, в которой разработаны модели, позволяющие описать особенности процесса образования и распространения трещин по границам соединения материалов при наличии связей, а также эффективные методы расчета квазистатического роста таких трещин вплоть до достижения предельного состояния, является, несомненно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка литературы из 296 наименований, 178 рисунков, 8 таблиц и изложена на 356 страницах печатного текста.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснование научных положений и выводов занимает значительное место в работе. Полученные в работе кривые деформирования связей между берегами трещины на границе адгезионного соединения при наличии промежуточного слоя и в композите, армированном волокнами, охватывают достаточно широкий диапазон реальных законов сопротивления раскрытию трещины в концевой зоне. Эти кривые используются затем при исследовании процессов разрушения по границам соединения материалов.

Приводятся физически обоснованная постановка задачи о трещине со связями на границе раздела материалов, решение которой сведено к нелинейной системе сингулярных интегро-дифференциальных уравнений (СИДУ) относительно усилий, действующих в зоне сцепления. Вывод этих уравнений основан на использовании производных функций Грина в задаче о межфазной трещине и принятой автором квазилинейной зависимости раскрытия такой трещины от усилий в концевой зоне. Для полноты исследования поведения трещин в конечном теле со связями в концевой области разработан также специальный вариант метода граничных интегральных уравнений (ГИУ), основанный на использовании фундаментального решения Кельвина. Метод позволил прямо вычислять неизвестное раскрытие трещины по всей длине, включая связанную часть трещины, в кусочно-однородном теле конечных размеров. Совершенно естественно, что в разработанном методе предусмотрено также решение задач теплопроводности и термоупругости.

Работоспособность и эффективность разработанных в диссертации методов численного решения СИДУ и ГИУ проверены путем сопоставления результатов решений, полученных этими методами, а также сравнения с известными численно-аналитическими и асимптотическими решениями и экспериментальными данными.

Подробно и с достаточно полной аргументацией изложена кинетика разрушения вдоль границы соединения материалов, начиная с возникновения участка ослабленных связей и заканчивая предельным состоянием межфазной трещины с концевой областью. Исследование влияния многочисленных параметров на процесс разрушения, к которым относятся относительная жесткость материалов, параметры, характеризующие закон деформирования связей, податливость связей, плотность связей, относительная трещиностойкость соединения, вид нагрузки, температура. Приведены также веские аргументы в пользу выбора предложенного нелокального критерия разрушения, применение которого рассмотрено как в случае адгезионного соединения материалов, так и для трещины в композите с подкрепляющими волокнами или частицами.

Вполне закономерным представляется анализ влияния механических свойств материалов и связей на коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) и энергетические характеристики трещины с концевой областью. Приведенные результаты такого влияния и сделанные на их основе выводы не вызывают сомнений и безусловно аргументированы. Разработанная методика применения нелокального критерия формирования и развития трещины со связями позволила обоснованно установить зависимость критической внешней нагрузки от вида кривой деформирования связей, а также от степени полимеризации связей. Положения, принятые при использовании кинетической модели термофлуктуационного разрушения в сочетании с моделью концевой области трещины для анализа формирования дефектов на

границе соединения материалов, основаны на существовании реальных эффектов, типичных для изделий микроэлектроники.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность результатов диссертации обусловлена математически выверенными и физически корректными и непротиворечивыми построениями моделей процесса разрушения по границам соединения материалов, использованием строгих математических методов, построением эффективных процедур численного решения нелинейной системы сингулярных интегро-дифференциальных уравнений, сопоставлением полученных аналитических и численных решений, которые в частных случаях совпадают с известными результатами других авторов.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные автором диссертации и основанные на корректной постановке рассмотренных задач и результатах их решений, являются новыми. Так, всесторонне и досконально исследован вопрос о возникновении и развитии трещины вдоль границы соединения материалов при учете связей, препятствующих раскрытию трещины и действующих в нормальном и тангенциальном направлении. С целью исследования напряженно-деформированного состояния в концевой области трещины построена нелинейная система сингулярных интегро-дифференциальных уравнений относительно усилий в связях при их нелинейном законе деформирования и при учете термофлуктуационной кинетики связей. Разработана методика численного решения указанной системы уравнений для связей с нелинейной диаграммой деформирования и с учетом кинетики термофлуктуационного распада связей.

Впервые построена и исследована физически обоснованная модель концевой области трещины на границе соединения материалов с учетом взаимосвязи нормальной и касательной мод деформирования и кинетики связей, многомасштабности структуры соединительного слоя между материалами, наличия подкрепляющих частиц и волокон. Сформулированы реалистичные законы деформирования связей между поверхностями трещины в концевой области для различных типов материалов. Разработан и применен нелокальный критерий развития трещин, учитывающий затраты энергии на деформацию связей в концевой области трещины, а также кинетику связей, и позволяющий следить за процессом разрушения – квазистатическим ростом трещины и смещением края её концевой части в результате разрыва связей. Разработаны методы расчета напряженно-деформированного состояния в концевой области и вблизи вершины трещины на границе соединения материалов, а также КИН для трещин на границе соединения материалов с учетом нелинейных законов деформирования связей и кинетики связей в концевой области трещины.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем.

В целом, в диссертации проведен достаточно полный цикл всесторонних исследований процесса разрушения по границе соединения материалов, который представляет собой решение многопараметрической проблемы определения влияния на этот процесс целого комплекса факторов. К ним относятся: характеристики законов деформирования связей, податливость и плотность связей в концевой зоне трещины, размер концевой зоны, упругие модули материалов, характеристики разрыва связей и трещиностойкость соединения, температура, вид нагрузки. Лично автором получены следующие наиболее существенные результаты:

1. Разработаны модели формирования и развития трещин по границе соединения материалов, учитывающие взаимосвязь нормальной и касательной мод деформирования в концевой области трещины, а также кинетику адгезионных связей в рамках термофлуктуационной теории разрушения. Для адгезионных соединений полимеров, а также композиционных материалов, армированных волокнами, получены законы деформирования связей в концевой области трещины, исходя из микромеханических моделей; разработан метод оценки долговечности связей в концевой области трещины, основанный на термофлуктуационной теории разрушения.

2. Разработаны методы решения задач механики разрушения для трещин на границе соединения материалов со связями в концевой области, размер которой не является малым по сравнению с характерным размером трещины. В рамках метода построена новая нелинейная система сингулярных интегро-дифференциальных уравнений для определения усилий в связях при нелинейном законе деформирования и термофлуктуационной кинетики связей. Получены выражения для определения коэффициентов интенсивности напряжений с учетом усилий в связях. С использованием метода граничных интегральных уравнений предложена техника исследования напряженно-деформированного состояния конечного тела, содержащего межфазные криволинейные трещины со связями.

3. Разработаны и реализованы алгоритмы численного решения сингулярных интегро-дифференциальных и граничных интегральных уравнений (ГИУ) в применении к структурам, содержащим трещины с концевой областью на границе соединения материалов. Проведено исследование численного решения системы сингулярных интегро-дифференциальных уравнений для трещин с линейно-упругими и нелинейными связями. Методом ГИУ получены и исследованы решения новых задач механики разрушения для межслойных трещин со связями в концевой области.

4. Предложен новый вариант нелокального критерия разрушения, учитывающий работу по деформированию связей в концевой области трещины и позволяющий контролировать продвижение края концевой области и рост трещины. Исходя из двух условий разрушения, исследован режим квазиста-

тического роста трещины. Выполнен сравнительный теоретический анализ применения предложенного энергетического и известного силового критериев разрушения при квазистатическом росте трещины в однородном теле при действии внешней нагрузки, нормальной плоскости трещины, и постоянных усилиях в связях. Предложен критерий формирования трещин в зоне ослабленных связей на границе соединения материалов, основанный на анализе кинетики связей.

5. Исследовано влияние механических свойств материалов и связей на коэффициенты интенсивности напряжений и энергетические характеристики межфазной трещины со связями в концевой области. Проведен анализ трещиностойкости соединений материалов при линейно-упругом и нелинейном законах деформирования связей в концевой области трещины. Исследован процесс формирования дефектов на границе соединения материалов при учете кинетики связей в концевой области трещины.

Замечания по работе.

1. Квазистатический рост межфазной трещины рассматривается в работе только вдоль границы соединения материалов. Возникает вопрос, существуют ли условия, при которых трещина может свернуть с границы, и можно ли определить эти условия, используя технику исследования, разработанную в диссертации.

2. Принятая в работе связь раскрытия трещины в концевой зоне с усилиями в этой зоне (1.32) физически непротиворечива только при неотрицательном нормальном раскрытии. Поэтому в тех случаях, когда решение задачи при действии касательной нагрузки демонстрирует отрицательное раскрытие трещины, это решение может содержать погрешность при вычислении исследуемых параметров квазистатического роста и предельного состояния трещины, в частности, длины связанной части трещины (стр. 153, 155) и коэффициентов интенсивности напряжений (стр. 255). Было бы полезным оценить эту погрешность.

3. Исследование процессов развития и роста трещины по границе соединения двух сред проводится в рамках линейной теории упругости. Поскольку в расчетах один из материалов обладает низким модулем Юнга, в ряде случаев в 100 раз меньше модуля Юнга другого материала, то раскрытие трещины может выходить за пределы применимости линейной теории упругости. Возможно, в таких случаях существует ограничение на величину действующей нагрузки.

4. При таком обилии параметров и обозначений ощущается отсутствие в работе списка обозначений.

5. Надпись к рисунку 3.1 не соответствует порядку расположения рис. 3.1a и рис. 3.1b.

Указанные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация составляет законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Полученные в ней новые и оригинальные результаты представляют большой практический и теоретический интерес и могут служить богатым методическим материалом для научных и инженерно-технических работников, а также в учебном процессе в ВУЗах.

Основное содержание диссертации изложено в 44 работах автора, из которых 10 в изданиях из перечня ВАК, 7 в рецензируемых международных журналах, и полно отражено в автореферате. Диссертация написана хорошим языком и на высоком профессиональном уровне.

Считаю, что работа «Модели и методы расчета процессов разрушения по границам соединения материалов» отвечает требованиям, предъявляемым к докторской диссертации, а ее автор Перельмутер Михаил Натанович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук,
профессор

Михаил Александрович Греков

198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 35
С.-Петербургский государственный университет, факультет прикладной математики – процессов управления, профессор
Тел.: (812) 4284492, E-mail: magrekov@mail.ru

31 октября 2015 г.

Сергей ризи м.а. Грекова заверило.

Машкина И.И.

и.о. зам. начальника Управления кадров

31.10.2015

