



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru; e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

01 СЕН 2026

№ 104-4914

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по
науке

Розенцвайг А.И.



2026 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертацию Кузнецова Дениса Александровича
на тему «Компьютерное моделирование и экспериментальные
исследования процессов разрушения квазихрупких материалов
при смешанном нагружении», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела**

Диссертация Д.А. Кузнецова «Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процессов разрушения квазихрупких материалов при смешанном нагружении» посвящена актуальным вопросам современной механики разрушения – проблеме разрушения квазихрупких материалов при смешанном нагружении (тип I + тип II), которое соответствует реальным условиям эксплуатации ответственных элементов конструкций. Использование двухпараметрической механики разрушения (учет T-напряжений) является современным трендом, повышающим точность прогнозов. В диссертационной работе реализован комплексный подход определения угла инициирования трещины при смешанном нагружении, объединяющий численный (конечно-элементный) расчет и экспериментальный анализ трех типов образцов (балка с надрезом, смещенным относительно силы приложения нагрузки, для испытаний трехточечный изгиб; балка с разрезом для испытаний на несимметричный четырехточечный изгиб; полый бразильский диск с круговым отверстием и надрезами) для трех материалов (ПММА, сферопласт, эбонит). Целью диссертационной работы является модификация широко используемых критериев распространения трещины, их сравнение, экспериментальная

верификация, компьютерное моделирование направления распространения в условиях смешанного нагружения в образцах из хрупких и квазихрупких материалов на основе предложенных критериев.

Цель работы состоит из трех главных взаимосвязанных компонентов: улучшение (модификация) существующих критериев разрушения (MTS, SED) путем учета Т-напряжений (первого несингулярного члена в разложении М. Уильямса), чтобы повысить точность оценки направления распространения трещины; валидация этих улучшенных критериев на практике путем проведения собственных экспериментов на специально подобранных образцах и компьютерного моделирования; формулировка практических рекомендаций и определение лучшего из модифицированных критериев для выбранной геометрии образца и диапазона смешанного нагружения.

Автор диссертационного исследования стремится сравнить модифицированные (двухпараметрические) критерии с классическими (однопараметрическими) и экспериментально доказать, что учет Т-напряжений обязателен для достоверного прогноза, особенно когда образец работает в условиях, близких к чистому сдвигу (режим II).

Для достижения этой цели, как указано в диссертации, решались следующие задачи: 1) получение КЭ-методом точных значений КИН и Т-напряжений для трех разных типов образцов; 2) критический анализ методов вычисления Т-напряжений и обоснование более точного способа; 3) анализ диапазонов смешанности мод (I+II) каждого образца, которые могут быть реализованы в экспериментальных условиях; 4) проведение экспериментов на разрушение для новых материалов (сферопласт, эбонит); 5) применение к экспериментальным конфигурациям образцов различных модифицированных критериев разрушения (GMTS, GSED, EMTSN и др.); 6) сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными формулировка выводов о применимости каждого из критериев.

Диссертация Д.А. Кузнецова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Введение диссертации посвящено содержательному обоснованию предстоящего исследования: оно начинается с доказательства актуальности темы, связанной с необходимостью перехода от классической однопараметрической механики разрушения к более точным двухпараметрическим моделям, учитывающим Т-напряжения, затем в нем дан критический обзор существующих методик и образцов с указанием их недостатков, после чего четко сформулированы цель работы (модификация

критериев разрушения с их последующей экспериментальной верификацией) и шесть конкретных задач, а также перечислены элементы научной новизны, включая предложение новых геометрий образцов и получение данных по ранее не изученным материалам (сферопласт, эбонит). Далее во введении описана теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов и публикациях, а также дана краткая аннотация структуры диссертации по главам, что в совокупности создает целостное представление о замысле, методах и ожидаемых результатах всей научной работы.

Первая глава диссертации посвящена теоретическому фундаменту исследования – она вводит читателя в базовые понятия механики разрушения и дает обзор существующих критериев предельного состояния тел с трещинами. Вначале автор классифицирует виды разрушения (хрупкое, квазихрупкое и вязкое) и подчеркивает, что наиболее опасным является именно хрупкое разрушение из-за его внезапности и быстроты. Затем следует исторический экскурс и разбор основных критериев: от энергетического подхода Гриффитса и силового критерия Ирвина (основанных на коэффициентах интенсивности напряжений) до более сложных деформационных и энергетических критериев, таких как критерий максимальных окружных напряжений Эрдогана–Си, критерий плотности энергии деформирования Си, а также интегральных и градиентных нелокальных критериев Новожилова–Нейбера и других авторов. Особое внимание в главе уделяется обоснованию перехода к двухпараметрической механике разрушения – автор подробно разбирает асимптотическое разложение Уильямса и показывает, почему помимо сингулярных слагаемых разложения необходимо учитывать и первый несингулярный член (T -напряжение), который отражает локальное стеснение деформаций у вершины трещины и может существенно влиять как на величину критической нагрузки, так и на направление роста трещины, особенно в условиях смешанного нагружения I+II. Глава завершается выводом о том, что классические однопараметрические критерии недостаточны для точного прогнозирования разрушения, что и обосновывает необходимость использования модифицированных двухпараметрических критериев в главах диссертации, посвященных экспериментальным наблюдениям. Таким образом, первая глава выполняет роль литературного обзора и методологической базы, создавая теоретическую платформу для всех последующих численных и экспериментальных исследований.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию процесса разрушения в смешанном режиме I+II на примере образца в виде балки прямоугольного поперечного сечения с краевой трещиной, подвергаемой асимметричному трёхточечному изгибу. Автор предлагает эту конфигурацию как простую в изготовлении и удобную для испытаний, генерируя смешанное нагружение либо сдвигом трещины относительно оси симметрии, либо сдвигом точки приложения нагрузки. Методом конечных элементов (пакет MSC. Marc) для широкого диапазона геометрических параметров рассчитаны коэффициенты интенсивности напряжений, а также T-напряжения, причём для повышения точности T-напряжения вычислялись по смещениям с отсечением 3–4 ближайших к вершине узлов сетки из-за осцилляций решения. На основе этих расчётов построены зависимости безразмерных геометрических коэффициентов, входящих в параметры разрушения, а также проанализированы параметры смешанности мод и двухосности, из чего сделан вывод, что данная геометрия не позволяет достичь чистого режима II и влияние T-напряжения в этом образце невелико. Экспериментальная часть главы включает испытания на двух материалах – сферопласте и ПММА – при статическом нагружении с фиксацией критической нагрузки и угла инициации трещины. Для прогнозирования использовались классический критерий максимальных окружных напряжений MTS и его обобщённая версия GMTS, учитывающая T-напряжение. Сравнение показало, что критерий GMTS даёт консервативные оценки критической нагрузки и лучше предсказывает углы инициации роста трещины, особенно при больших смещениях, хотя для ПММА результаты оказались заметно точнее, чем для сферопласта (где при больших эксцентриситетах наблюдались расхождения из-за сложности установки образцов на опоры). В итоге автор признаёт ограниченность данного образца по диапазону смешанности мод, но рекомендует его для испытаний вследствие простоты конфигурации и хорошей согласованности численных и экспериментальных данных в доступном диапазоне.

Третья глава диссертации посвящена исследованию разрушения хрупких материалов в условиях смешанного нагружения на примере образца в виде балки прямоугольного поперечного сечения с краевой трещиной (смещенной относительно линии симметрии образца), подвергаемой антисимметричному четырёхточечному изгибу. В отличие от образца, рассмотренного во второй главе, данная конфигурация позволяет получить весь спектр мод смешанного нагружения и включает чистый режим поперечного сдвига и практически чистый режим нормального отрыва.

Автор проводит обширное конечно-элементное моделирование (проанализировано 360 геометрических конфигураций), варьируя относительную длину трещины и относительный сдвиг, и получает зависимости безразмерных коэффициентов, входящих в параметры разрушения, от геометрических характеристик образца. Для прогнозирования автор применяет сразу шесть критериев разрушения: обобщённый критерий максимальных окружных напряжений GMTS, расширенный критерий максимальных окружных деформаций EMTSN, обобщённый критерий плотности энергии деформирования GSED, обобщённый критерий максимальных окружных осреднённых напряжений MATS, критерий максимальной скорости высвобождения упругой энергии MERR и его обобщённую версию GMERR; при этом для критериев EMTSN и GSED автор выводит точные аналитические выражения для обобщённой вязкости разрушения. Сравнение с экспериментом показывает, что критерии GMTS, GSED, MATS, MERR и GMERR демонстрируют хорошее согласие, тогда как EMTSN даёт консервативные (заниженные) оценки; дополнительно проанализировано влияние коэффициента Пуассона на угол инициации трещины, причём для EMTSN увеличение ν снижает прогнозируемый угол вблизи режима II, а для GSED – наоборот, увеличивает, причём разница между GSED и SED возрастает при уменьшении ν . Глава завершается выводом, что предложенный образец пригоден для изучения разрушения в чистом II и смешанном I+II режимах, хотя для чистого режима I трёхточечный изгиб остаётся более предпочтительным.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию разрушения при смешанном деформировании на примере бразильского диска с центральным круглым отверстием, ослабленного двумя внутренними краевыми радиальными трещинами, причём смешанное нагружение достигается поворотом этих трещин на некоторый угол относительно вертикальной оси. Автор проводит обширное конечно-элементное моделирование (проанализировано 615 конфигураций), варьируя длину трещины, радиус отверстия и угол ориентации, и получает зависимости безразмерных коэффициентов, входящих в параметры разрушения, от геометрических характеристик. Глава завершается выводом, что бразильский диск с круговым отверстием и двумя надрезами является удобным и информативным испытательным образцом для изучения смешанного разрушения I+II в таких материалах как плексиглас, эбонит, гетинакс, а критерий GSED рекомендован как наиболее точно предсказывающий критическую нагрузку.

Основные выводы диссертационной работы, сформулированные в разделе «Заключение», можно обобщить по трем ключевым направлениям: методологическому, экспериментальному и практико-рекомендательному.

Основные положения, выносимые как итог исследования.

1. Автором предложен и обоснован более точный метод вычисления Т-напряжений по смещениям, который требует исключения из рассмотрения 3–4 ближайших к вершине трещины узлов конечно-элементной сетки (из-за сильных осцилляций решения в этой зоне). Для всех трех типов образцов получены обширные массивы данных по коэффициентам интенсивности напряжений и Т-напряжениям для широкого диапазона геометрических параметров, что позволяет использовать эти данные для ускоренных инженерных расчетов.

2. Проведено систематическое сравнение классических (однопараметрических) и модифицированных (двухпараметрических) критериев. Установлено, что: 1) критерии GMTS (обобщенный максимальных окружных напряжений) и GSED (обобщенный плотности энергии деформирования) демонстрируют наилучшую сходимость с экспериментальными данными для всех исследованных материалов и конфигураций образцов; 2) критерий EMTSN (расширенный максимальных окружных деформаций) дает консервативные (заниженные) оценки критической нагрузки, что, однако, может быть полезно для инженерных расчетов «в запас прочности». При этом для условий плоского напряженного состояния (ПНС) этот критерий согласуется с экспериментом лучше, чем для плоской деформации (ПДС), даже если геометрия образца предписывает ПДС.

Энергетические критерии MERR и GMERR, а также нелокальный критерий MATS показали результаты, близкие к GMTS, но их применение требует более сложных вычислений. Балка с трещиной для испытаний на трехточечный изгиб (Глава 2) проста в изготовлении, но не охватывает весь диапазон смешанности мод (не достигает чистого режима II). Она рекомендована для испытаний материалов при наклонных трещинах в ограниченном диапазоне смешанности.

Балка для антисимметричного четырехточечного изгиба (Глава 3) позволяет получить чистый режим II и весь спектр смешанного нагружения, однако не дает полностью чистого режима I. Для чистого I режима по-прежнему рекомендован трехточечный изгиб.

Полый бразильский диск (Глава 4) признан удобным и информативным образцом, позволяющим плавно переходить от чистого I к чистому II режиму

путем поворота трещин. Он рекомендован для изучения смешанного разрушения в технических материалах (плексиглас, эбонит, гетинакс).

3. Показано, что знак Т-напряжения критически влияет на прогнозируемый угол инициации трещины: отрицательные (сжимающие) Т-напряжения уменьшают угол начала разрушения по сравнению с классическими критериями, а положительные (растягивающие) – увеличивают. Также установлено, что в условиях смешанного нагружения влияние коэффициента Пуассона ν на угол инициации существенно, причем для критерия EMTSN и GSED оно имеет противоположную направленность, а разница между обобщенным (GSED) и классическим (SED) критериями возрастает при уменьшении ν .

Итоговый вывод: двухпараметрическая механика разрушения с обязательным учетом Т-напряжений позволяет достоверно прогнозировать начало смешанного разрушения хрупких и квазихрупких материалов. Для практического использования наиболее рекомендованы критерий GSED (как дающий максимальную точность) и критерий GMTS (как более простой в вычислительном отношении в паре с образцом балки с асимметрично расположенной трещиной или полого диска, в зависимости от доступного оборудования и требуемого диапазона смешанности мод).

Актуальность исследования обусловлена несколькими взаимосвязанными факторами как практического, так и фундаментального характера.

Во-первых, практическими запросами промышленности: создание новых современных материалов, ужесточение условий эксплуатации конструкций (в машиностроении, добывающей промышленности, строительстве), необходимость увеличения сроков службы и совершенствование технологий изготовления требуют модернизации подходов к расчетам на прочность. При этом наличие трещиноподобных дефектов (скоплений дислокаций, непроваров, расслоений, коррозионных повреждений и т.д.) является одним из самых важных факторов, вызывающих разрушение, что делает исследования в области построения простых и точных аналитических моделей крайне востребованными для инженерной практики.

Во-вторых, недостаточностью классических методов: традиционная линейная механика разрушения, основанная на однопараметрическом подходе (использующем только коэффициенты интенсивности напряжений), не всегда позволяет достоверно описать напряжённо-деформированное состояние в окрестности вершины трещины, особенно в условиях смешанного нагружения. Это связано с тем, что геометрия образца, вид

нагружения и масштабный эффект влияют на локальное стеснение деформаций у вершины трещины, которое описывается первым несингулярным членом разложения Вильямса – Т-напряжением. В работах предшественников (например, [12–15] по списку литературы) уже была показана значимость Т-напряжения, но его систематический учёт в критериях разрушения для новых типов образцов и материалов оставался недостаточно проработанным.

В-третьих, необходимостью расширения номенклатуры испытательных образцов: несмотря на наличие большого числа работ по выбору подходящих образцов для изучения смешанного разрушения, автор отмечает, что требуется постоянное расширение их номенклатуры, так как это способствует повышению информативности экспериментальных программ, позволяет исследовать сценарии разрушения, приближенные к реальным промышленным приложениям, и более детально анализировать необратимые процессы в зоне предразрушения. При этом для новых или сложных геометрий параметры, управляющие ростом трещины (КИН и Т-напряжения), не имеют аналитических выражений и должны вычисляться численно для каждого типа образца.

Таким образом, **актуальность диссертационного исследования** определяется наличием насущной необходимостью инженерной практики в надёжных и простых методах прогнозирования разрушения хрупких и квазихрупких материалов в условиях смешанного нагружения и недостаточной разработанностью двухпараметрических критериев, учитывающих Т-напряжения, для широкого класса образцов и материалов. Диссертация направлена на устранение этого пробела путём модификации критериев, их экспериментальной верификации и разработки рекомендаций их применения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих основных положениях.

1. Предложены новые модифицированные конфигурации опытных образцов с трещинами, которые позволяют получить весь диапазон смешанности режимов разрушения I+II, включая чистый I и чистый II режимы (в частности, для антисимметричного четырёхточечного изгиба и полого бразильского диска).

2. В результате компьютерного моделирования получены уникальные массивы данных (для 360 геометрических конфигураций в главе 3 и 615 в главе 4), содержащие параметры, управляющие ростом трещины (КИН и Т-напряжения) при смешанном нагружении образцов различной геометрии.

Эти данные могут быть использованы как справочные для инженерных расчетов без необходимости повторного КЭ-моделирования.

3. Проведены экспериментальные исследования вязкости разрушения новых материалов – сферопласта (пористо-армированный композит со стеклянными микросферами) и эбонита – в условиях смешанного нагружения. Для этих материалов ранее не существовало систематических данных о трещиностойкости в смешанном режиме, что делает полученные результаты оригинальными.

4. Для прогнозирования направления распространения трещины и величины критической нагрузки использованы двухпараметрические критерии разрушения, учитывающие Т-напряжение (GMTS, EMTSN, GSED, MATS, GMERR), причём впервые проведено их систематическое сравнение на трёх различных геометриях образцов. В частности, впервые применён обобщённый критерий максимальных окружных осреднённых напряжений (MATS) в комплексе с другими критериями для данной номенклатуры образцов.

5. Получено точное аналитическое представление обобщённой вязкости разрушения (обобщенного критического коэффициента интенсивности напряжений) для деформационного критерия EMTSN и энергетического критерия GSED. Для критерия GSED автором исправлена неточность, допущенная в литературе [43, 44], где было дано неверное выражение для критического значения плотности энергии деформирования из-за ошибочного предположения о равенстве Т-напряжений в условиях чистого режима I.

6. Предложен усовершенствованный метод вычисления Т-напряжений по смещениям с отсечением 3–4 ближайших к вершине трещины узлов конечно-элементной сетки, поскольку в ближайшем к вершине элементе наблюдаются сильные осцилляции решения, не упоминаемые в литературе. Это позволяет повысить точность численного определения Т-напряжений.

7. Впервые детально проанализировано влияние знака Т-напряжения (растягивающего или сжимающего) на прогнозируемый угол инициации трещины для исследованных образцов, а также проведён систематический анализ влияния коэффициента Пуассона на оценку угла начала разрушения по критериям EMTSN и GSED, показано, что в условиях смешанного нагружения разница между обобщёнными и классическими критериями возрастает при уменьшении коэффициента Пуассона.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяются совокупностью нескольких факторов. Вот основные из них:

1. Корректное применение математического аппарата и апробированных методов: автор использует строгие соотношения линейной механики разрушения (асимптотические разложения Уильямса, J-интеграл, связь КИН с энергией деформирования), которые являются общепризнанными и хорошо верифицированными. Все критерии разрушения (GMTS, EMTSN, GSED, MATS, MERR, GMERR) реализованы с соблюдением их исходных формулировок, а для двух из них (EMTSN и GSED) автором выведены точные аналитические выражения обобщённой вязкости разрушения, что исключает ошибки численной реализации.

2. Сходимость и верификация конечно-элементных расчётов. Проведён анализ сходимости сеток: сравнение результатов на прямоугольной и радиальной сетках показало незначительное расхождение, что подтверждает независимость результатов от дискретизации. Использование сингулярных элементов (сдвиг промежуточного узла на четверть длины ребра к вершине трещины) обеспечивает корректное воспроизведение особенности напряжений $\sim 1/\sqrt{r}$. При вычислении J-интеграла использовались 4 контура интегрирования, причём результаты для 3-го и 4-го контуров отличались незначительно, что свидетельствует о контурной независимости интеграла. Для T-напряжений предложен и обоснован метод вычисления по смещениям с отсечением осциллирующих узлов, что повышает достоверность этого сложного для расчёта параметра.

3. Сопоставление численных решений с известными справочными и литературными данными: автор неоднократно сравнивает полученные КЭ-результаты с доступными аналитическими решениями (в том числе для стандартных геометрий) и отмечает их совпадение в пределах допустимой погрешности. Это подтверждает правильность построенных конечно-элементных моделей.

4. Многоуровневое экспериментальное подтверждение: эксперименты проведены на трёх различных типах образцов и трёх материалах (ПММА, сферопласт, эбонит) с разными механическими свойствами, что исключает случайность полученных закономерностей; для каждого типа нагружения и геометрии испытано по 3–5 идентичных образцов, что позволяет оценить статистическую разбросанность результатов; эксперименты выполнены на сертифицированном испытательном оборудовании при контролируемых условиях (статическая нагрузка, комнатная температура, фиксированная

скорость траверсы 1 мм/мин); предварительно определены все необходимые механические характеристики материалов (E , ν , σ_t , K_{IC}) в независимых тестах (одноосное растяжение и симметричный трёхточечный изгиб), что обеспечивает корректность входных данных для критериев.

5. Сравнение расчётных и экспериментальных данных: во всех трёх экспериментальных главах: проведено прямое сопоставление прогнозируемых критических нагрузок и углов инициации с экспериментально измеренными величинами. Показано, что для рекомендованных критериев (GMTS, GSED) расхождение находится в пределах, характерных для инженерных исследований, а для ряда случаев (например, ПММА в главе 2) наблюдается практически полное совпадение. Для критерия EMTSN систематически получены консервативные оценки, что также имеет физическое объяснение и не противоречит теории.

6. Согласованность результатов с исследованиями других авторов: автор ссылается на работы других исследователей (например, [12–15, 30, 59, 73, 81, 93]), где также подтверждается значимость T -напряжений и эффективность двухпараметрических критериев. Полученные в диссертации закономерности (влияние знака T -напряжения на угол инициации, зависимость от коэффициента Пуассона) качественно совпадают с выводами предшественников, что свидетельствует о физической непротиворечивости результатов.

7. Апробация результатов на авторитетных конференциях и публикации в рецензируемых журналах: основные результаты докладывались на всероссийских конференциях и опубликованы в 6 статьях, включая 3 в журналах из перечня ВАК и 1 в журнале первого квартиля (Q1) Web of Science – "Engineering Fracture Mechanics". Это означает, что результаты прошли независимое рецензирование квалифицированными специалистами в области механики разрушения.

Таким образом, достоверность обеспечена комплексным подходом: строгость теории верифицируется численно, численные результаты проверяются экспериментом, эксперимент статистически повторяется, а все выводы согласуются с фундаментальными законами механики и данными других исследователей.

Автореферат полностью соответствует диссертации и представляет собой её корректное сжатое изложение.

Диссертация полностью соответствует специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела: пункт 10. Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения

твёрдых тел. Пункт 13. Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов. Пункт 12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

По диссертации можно сформулировать следующие замечания.

1. Все экспериментальные исследования проведены на полимерах и композитах (ПММА, эбонит, сферопласт), которые при комнатной температуре проявляют квазихрупкое поведение. Однако выводы и рекомендации работы сформулированы в обобщённом виде – для "хрупких и квазихрупких материалов". Это создаёт риск, что предложенные критерии и образцы могут давать худшие результаты для металлов, горных пород или керамик, у которых пластическая зона у вершины трещины более развита или структура неоднородна. Для подтверждения универсальности следовало бы провести хотя бы одну серию экспериментов на материале с иной природой разрушения (например, на известняке или алюминиевом сплаве).

2. Во всех главах критическое расстояние вычисляется по формуле Ирвина (2.18). Однако:

- в работе не обсуждается, насколько это приближение корректно для квазихрупких материалов, у которых зона предразрушения может быть существенно больше, чем оценка по формуле Ирвина;

- нет анализа чувствительности результатов к вариациям критического расстояния (например, $\pm 20\text{--}30\%$), хотя это критически важно, так как эта величина входит во все критерии (GMTS, EMTSN, GSED, MATS) и влияет как на углы инициации, так и на критические нагрузки;

- в критерии MATS автор использует критическое расстояние как размер зоны осреднения, но не обосновывает, почему именно критическое расстояние (полученное из чистого I режима) должно совпадать с длиной зоны предразрушения при смешанном нагружении.

3. В работе указано, что для каждого типа нагружения и геометрии испытано по 3–5 одинаковых образцов. Однако ни в одной из глав не приведены статистические оценки – ни стандартные отклонения, ни доверительные интервалы, ни размах значений критических нагрузок и углов инициации. На всех графиках (рис. 2.8, 3.8, 4.10) экспериментальные точки показаны как единичные ромбики без "усов" погрешностей. Это не позволяет оценить, насколько разброс данных перекрывается с расчётными кривыми, и является ли расхождение в 10–15% статистически значимым или находится в пределах погрешности измерений.

4. Автор не приводит полное описание процедуры измерения угла инициации трещины. Автор приводит таблицы и графики углов инициации (табл. 2.2, 2.3, рис. 2.9, 2.10, 3.9–3.11, 4.11). Однако:

Не указано, как именно измерялся угол на разрушенных образцах – по макрофотографии, с помощью оптического микроскопа или программного обеспечения.

Нет оценки погрешности измерения угла (например, $\pm 1^\circ$ или $\pm 5^\circ$), хотя это критически важно для сравнения с теоретическими значениями.

В некоторых случаях (например, для сферопласта, рис. 2.7) траектории трещин имеют изогнутую форму, и неясно, измерялся ли угол в начальной точке (у вершины исходной трещины) или осреднялся по всей траектории.

5. В настоящее время в классической механике разрушения сложилось четкое понимание о необходимости учета высших приближений в асимптотическом представлении М. Уильямса с удержанием не только Т-напряжений, но и следующих за ним слагаемых. Уже достаточно давно в экспериментальных исследованиях, проводимых, например, интерференционно-оптическими методами, удерживают 5-9 слагаемых и находят коэффициенты, фигурирующие в данных слагаемых, посредством переопределенного метода. К сожалению, автор совсем не освещает необходимость удержания высших приближений в разложении М. Уильямса и их влияние на оценки угла распространения трещины, хотя этим вопросам посвящена обширная литература.

6. В списке литературы недостаточно свежих работ (2024–2026 гг.): хотя диссертация защищается в 2026 году, в списке практически нет статей, опубликованных после 2023 года, за исключением собственных публикаций автора и одной работы 2024 года [66]. Это приемлемо для диссертации (основная работа велась несколько лет), но могло бы усилить актуальность, если бы были включены 2–3 самые свежие обзорные статьи по теме Т-напряжений.

Отмеченные недостатки, пожелания и вопросы не отменяют общего положительного впечатления от работы.

Заключение

Диссертационная работа Кузнецова Д.А. «Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процессов разрушения квазихрупких материалов при смешанном нагружении» содержит новые вычислительные и экспериментальные результаты и положения, представляющие научный интерес и обладают научной значимостью. Диссертационная работа Д.А. Кузнецова характеризуется полнотой и

завершенностью, ясно и грамотно написана, хорошо проиллюстрирована графиками и рисунками. Диссертационная работа выполнена автором на современном уровне с привлечением современных вычислительных средств и современного экспериментального оборудования. Представленные в диссертации результаты достоверны, выводы обоснованы. Применяемые в работе подходы могут быть использованы при изучении актуальных задач нелинейной механики разрушения.

Диссертация Кузнецова Д.А. «Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процессов разрушения квазихрупких материалов при смешанном нагружении» отвечает критериям, изложенным в пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в части, касающейся ученой степени кандидата наук, а ее автор Кузнецов Денис Александрович достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела.

Доклад по завершеному исследованию заслушивался на расширенном заседании кафедры математического моделирования в механике Самарского национального университета, отзыв обсужден и утвержден за заседании кафедры математического моделирования в механике Самарского университета 17 июня 2026 года, протокол № 10.

Заведующий кафедрой
математического моделирования в механике

д.ф.-м.н., доцент



Степанова Лариса Валентиновна

Доцент кафедры математического
моделирования в механике

к.ф.-м.н.



Бахарева Юлия Николаевна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Сокращенное наименование: Самарский университет

Почтовый адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

Тел. (846) 335-18-26 (приемная ректора) (846) 267-43-70 (канцелярия)

Адрес электронной почты ssau@ssau.ru

Web-сайт организации: <http://ssau.ru>



Степановой Л.В., Бахарева Ю.Н.	
Подпись	удостоверяю
Ученый секретарь Самарского университета	
	Васильева И.П.
«01»	сентября 2026 г.