

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

Утверждаю



12.10.2016 № 1089/01-2171.2-524

На № _____

Отзыв ведущей организации
на диссертацию Ефимова Виктора Прокопьевича
“РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ,
ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАЗРУШЕНИЕ
ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ”,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Для многих технических изделий и конструкций характерно хрупкое или квазихрупкое разрушение, множество примеров которого можно найти в современной литературе. Проблемы прочности и хрупкого разрушения конструкций имеют большое значение в таких отраслях как строительство, машиностроение, горное дело. Для проведения расчетов по разрушению, определению ресурса конструкции при известных или планируемых напряжениях необходимо знание величин, которые характеризуют прочностные свойства конкретных материалов в зависимости от времени их действия или скорости нагружения. Работа посвящена развитию методов определения характеристик длительной прочности хрупких сред и горных пород, а также разработке алгоритмов определения прочности при растяжении в неоднородных полях напряжений. Этим обусловлены **актуальность** и **практическая значимость** работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и списка литературы из 285 наименований. Общий объем рукописи – 270 страниц в формате машинописного текста.

В первой главе приведен обзор и анализ литературы по вопросам прочности хрупких сред в зависимости от временных характеристик поля напряжений и от

неоднородности напряжений в пространстве, в частности, модели, предложенные для объяснения временной зависимости прочности твердых тел при растяжении и кинетическая концепция прочности С.Н. Журкова. Рассмотрены существующие методы измерения трещиностойкости различных материалов, особенности их использования для таких хрупких материалов, как горные породы.

Во второй главе излагается кинетический подход к описанию временных аспектов прочности твердых деформируемых сред. Обсуждается вопрос о диапазоне применения формулы долговечности С.Н. Журкова. Представлен метод определения параметров среды, используемых для описания длительной прочности в модели С.Н. Журкова, основанный на зависимости прочности от скорости нагружения. Приведены методы оценки данных параметров по испытаниям на трещиностойкость.

В третьей главе излагаются методы определения прочности хрупких сред и горных пород в условиях неоднородного напряженного состояния. Рассматривается применение нелокальных критериев прочности к разрушению хрупких материалов. Предложено объяснение разницы в величинах прочности, полученных в результате применения различных схем испытаний на растяжение, проявлением влияния масштаба механической структуры среды. Обсуждается модификация метода «бразильской пробы» и приводятся результаты испытаний на образцах диаметром 37.8 мм и толщиной 16-20мм.

В четвертой главе рассматривается метод определения трещиностойкости, основанный на разрушении компактного квадратного образца клиновидным индентором. Содержание главы в основном соответствует кандидатской диссертации автора «Определение трещиностойкости по разрушению компактного образца расклиниванием» (Новосибирск, ИГиЛ СО РАН, 1993 г.), в которой был предложен метод определения трещиностойкости на основе анализа податливости компактного образца с учетом эффектов трения и продольного сжатия. Для ряда горных пород различной крепости и оргстекла на этой основе определены величины трещиностойкости. Также представлена динамическая калибровка методом каустики и сравнение методик на плоских образцах из оргстекла размером 100X100X18мм.

Достоверность научных результатов подтверждается:

- использованием апробированной регистрирующей аппаратуры, тарированной по эталонным приборам;
- сравнением полученных характеристик с данными других авторов или справочников, которое показывает их удовлетворительное совпадение;
- совпадением результатов, полученных независимыми экспериментальными методами.
- применением апробированных методов статистической обработки экспериментальных данных.

Диссертация доложена на российских конференциях и семинарах. Результаты диссертации были представлены и получили положительную оценку на научном семинаре Лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН (руководитель семинара – член – корреспондент РАН Р.В. Гольдштейн). Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Главными достижениями автора являются следующие результаты:

- разработан и апробирован метод определения параметров уравнения долговечности, основанный на регистрации зависимости прочности горных пород от скорости нагружения;

- предложен метод оценки безопасного напряжения в модели разрушения С.Н. Журкова;

- определены (впервые) на одних и тех же горных породах величины начальной энергии активации разрушения при сжатии, растяжении и изгибе, показано, что эффективная величина начальной энергии активации разрушения не зависит от вида напряженного состояния.

- дан анализ возможных неточностей определения параметров уравнения долговечности, которые встречаются при испытании сред, обладающих слабо выраженной зависимостью прочности от скорости нагружения;

- проанализировано влияние структуры среды на прочностные свойства хрупких сред при испытаниях образцов в условиях неоднородного растяжения, когда характерный размер элемента структуры сравним с размером характерной неоднородности поля напряжений. Модели с использованием нелокальных критериев прочности позволили согласовать величины прочности, полученные при разных видах испытаний;

- разработан алгоритм расчета прочности на растяжение по результатам испытаний на изгиб с учетом структуры среды;

- предложена модификация способа обработки результатов испытаний на растяжение методом “бразильской пробы” с применением нелокальных критериев разрушения, повышающая достоверность испытаний по сравнению со стандартным бразильским тестом;

- оптическим методом каустики откалибрована методика определения трещиностойкости, основанная на регистрации двух параметров разрушения: длины трещины и усилия внедрения инструмента.

Значимость работы для развития механики деформируемого твердого тела

Предложенные методы позволяют получать величины прочности горных пород и хрупких сред на растяжение более простыми и менее затратными способами по сравнению со стандартными испытаниями на одноосное однородное растяжение, что важно при исследовании закономерностей деформирования и прочности указанных материалов и сред и проведении экспресс-диагностики.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания:

1. В главах 2, 3 автор, формализуя взаимосвязь долговечности и условий нагружения, опирается на схематическое представление одного (молекулярного) механизма разрушения, сводящегося к разрыву и восстановлению молекулярных связей. Эта традиционная качественная трактовка формулы С.Н. Журкова фактически исключает из рассмотрения влияние промежуточных по масштабу структурных и текстурных преобразований, существование внутренних напряжений и связанных с ними потоков энергии. Влияние этих преобразований,

по мнению автора, может быть компенсировано введением иерархически нечувствительного концентрационного критерия, который сохраняет свое значение на всех стадиях накопления и кластеризации дефектов. Вывод автора (стр. 48) о полезности уравнения долговечности без анализа конкретного механизма разрушения соответствует упомянутой трактовке. Этот подход фактически предполагает сохранение упруго-хрупкого термофлуктуационного механизма предразрушения на всех этапах подготовки локализованного разрушения. При этом приводимые соотношения в приложении к горным породам фактически имеют иллюстративный характер, а получаемые величины констант кинетического уравнения характеризуют некоторые осредненные показатели в масштабе образца. Неясно, какие параметры разрушения в ином масштабе (например, скальном массиве) можно получить на их основе.

2. В работе предложен способ расчета безопасного напряжения на основе условия равенства количества разорванных и рекомбинированных связей (по формальным показателям начальной энергии активации разрушения и рекомбинации). Определение уровня напряжений, обеспечивающих гарантированную целостность объекта, представляет несомненный интерес. Предложенный способ проиллюстрирован на данных о прочности металлов и сплавов. Эти оценки предлагается распространить на гораздо более структурированные горные породы с использованием данных о прочности пород при растяжении, изгибе и сжатии. Существование структуры промежуточного масштаба, обладающей способностью локальной концентрации напряжений и другими вариантами перераспределения напряжений, делает неубедительным представление о безопасном напряжении, рассчитанном по осредненным параметрам среды. Это отчасти подтверждается данными автора, в которых расчетный уровень безопасного напряжения для исследованных материалов составляет около 10% их прочности. Такой уровень в качестве границы безопасности практически неприемлем для реализуемых напряженных конструкций. К сожалению, в работе не предложен метод и не проведена экспериментальная проверка полученного соотношения (потребное время такой проверки порядка 10^{20} с). Поэтому полученные оценки представляются асимптотикой долговечности при больших временах.

3. Значительную часть работы составляют методики определения постоянных, входящих в уравнение долговечности и результаты испытаний по предложенным методикам. К ним относятся определение прочности при изгибе, растяжении и сжатии при различных скоростях нагружения, а также трещиностойкость.

Автор видит решение вопроса о повышении достоверности данных испытаний прочности при растяжении «бразильским» методом в его модификации введением концентратора напряжений – отверстия в центре сжимаемого по диаметру диска. При этом он опирается на результаты работы (Wellor M., Hawkes I. Measurement of tensile strength by diametral compression of disks and annuli // Eng. Geol. 1971. Vol. 5. P. 173–222) и собственные сравнительные исследования. Напомним также, что образец такого типа с надрезом служит одной из базовых

форм для определения трещиностойкости (см. об этом Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. Т. 1). Показано, что закрепление очага разрушения в центре образца посредством отверстия уменьшает разброс показаний, связанный с влиянием процессов на контактах с плитами пресса. Чтобы избежать значимого отличия измеренной прочности при разрыве от данных по одноосному растяжению автор ограничивается учетом эффекта присутствия структурного размера материала, усредняющего напряжения растяжения по нормали к оси сжатия в некоторой окрестности концентратора. Вместе с тем на интерпретацию результатов эксперимента в сложно структурированной среде горных пород может влиять неоднородность напряженного состояния модифицированного образца – сочетание растяжения и сжатия по оси нагружения. Известны механизмы трансформации напряжений сжатия в локальное растяжение на элементах структуры горных пород (Германович Л.Н., Дыскин А.В., Цырульников Н.М. Модель деформирования и разрушения хрупких материалов с трещинами при одноосном сжатии // Известия РАН МТТ. 1993. № 1. С. 127–143 и др.). Такие варианты влияния автором не рассматривались.

4. Формула С.Н. Журкова относится к ситуациям, когда нагружение одноосное, и может быть охарактеризовано напряжением σ , входящим в указанную формулу. Автор не комментирует, каким образом предполагается использовать формулу С.Н. Журкова в случаях, когда напряжённое состояние характеризуется несколькими компонентами тензора напряжений.

5. Содержание главы 4 в основном соответствует кандидатской диссертации автора «Определение трещиностойкости по разрушению компактного образца расклиниванием» (Новосибирск, ИГиЛ СО РАН, 1993). В ней был предложен метод определения трещиностойкости на основе анализа податливости компактного (квадратного) образца с учетом эффектов трения между внедряющимся клином и стенками надреза и продольного сжатия образца, опирающегося на плоскую площадку. Там же представлена динамическая калибровка разработанной методики методом каустики, продемонстрированная на образцах из оргстекла размером 100X100X18мм. Ссылка на диссертацию приведена только в отношении одной формулы (4.32).

6. В разделах, посвященных анализу взаимосвязи трещиностойкости и долговечности (главы 1, 2), отсутствуют ссылки на базовые работы Г.И. Баренблатта, В.М. Ентова, Р.Л. Салганика о применении термофлуктуационной теории в механике разрушения (Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.Л. О кинетике распространения трещин. Условия разрушения и длительная прочность // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1966. № 6. С. 76–80. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Салганик Р.Л. О кинетике распространения трещин. Флуктуационное разрушение. // Инженерный журнал. Механика твердого тела. 1967. № 1. С. 122–128 и др.).

7. Утверждение об эквивалентности энергетического и силового подходов (стр.32) не всегда справедливо в механике разрушения (Костров Б.В., Никитин

Л.В., Флитман Л.М. Механика хрупкого разрушения // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1969. №3. С. 112–125.).

8. Обзор состояния исследований по теме диссертации содержит всего лишь немногим более 10 ссылок на работы, опубликованные после 2000 года (не считая ссылки на собственные работы автора). Это входит в противоречие с утверждением об актуальности проблематики диссертации и не отражает истинное состояние вопроса.

9. Текст не свободен от стилистических неточностей и опечаток:

- в утверждении на стр. 6 «Теоретическое описание процесса разрушения требует дополнительного параметра к используемым механическим постоянным, который имеет принципиальное значение, а именно, критерия разрушения». *Параметр не всегда критерий.*

- на стр.49-50 параметр К не введен.

- на стр. 51-53 – использован термин: потенциальная «ямка» -, однако общепринятый термин в квантовой механике и физике твердого тела – «потенциальная яма», см. О. Маделунг. Физика твердого тела. Локализованные состояния, М.: Наука., 1985.— 184 с.

- сдвинута нумерация в ряде ссылок и рисунков:

на стр. 101 приведена ссылка [224] (нужно [225]),

на стр. 103 приведена ссылка [158] (нужно [160]),

на стр. 87 – ссылка на рис. 21а (нужно рис. 23а)

и др.,

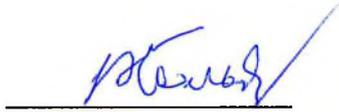
но это не мешает пониманию работы.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку диссертации. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации, давая ясное представление о постановке исследования и основных результатах.

Считаем, что диссертация Виктора Прокопьевича Ефимова «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов» представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне, и удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки). Виктор Прокопьевич Ефимов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по данной специальности.

Отзыв обсужден на заседании семинара Лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций под руководством чл.-корр. РАН Р.В. Гольдштейна, 28 сентября 2016 г., протокол № 11.

Заведующий лабораторией механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)



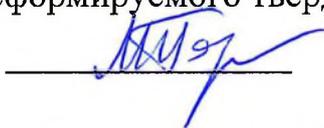
Гольдштейн Роберт Вениаминович

Старший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, кандидат технических наук (01.04.07 - физика твердого тела)



Осипенко Николай Михайлович

Старший научный сотрудник лаборатории механики прочности и разрушения материалов и конструкций ИПМех РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04 – механика деформируемого твердого тела)



Перельмутер Михаил Натанович

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1; (495) 434-00-17; ipm@ipmnet.ru; <http://www.ipmnet.ru>.