

ОТЗЫВ

официального оппонента Аннина Бориса Дмитриевича на диссертацию
Ефимова Виктора Прокопьевича на тему «**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

Диссертация Ефимова В.П. посвящена актуальной теме разработке методов испытаний хрупких сред с целью получения характеристик длительной прочности этих материалов в условиях неоднородного напряженного состояния, с приложением к горным породам. Временные аспекты разрушения важны в задачах определения ресурса различных геотехнических объектов, при оценке безопасного напряжения, при прогнозировании разрушения.

Для учета временных аспектов разрушения в диссертации выбрана концепция прочности С. Н. Журкова, в которой прочность рассматривается как сопротивление разрушению, вызванное как приложенным напряжением, так и тепловым движением молекул. В работах исследователей из научной школы С.Н. Журкова многие эксперименты были проведены на специфических образцах из материалов с малым разбросом механических характеристик, и перенесение таких испытаний на другие материалы, в частности на горные породы, вызывает существенные трудности. Соискатель остановил свой выбор на измерении прочности образцов в зависимости от скорости нагружения. Это позволило ему получить большой объем надежного экспериментального материала, использование которого дало возможность определить параметры исследованных сред, входящие в уравнение долговечности Журкова, и анализировать результаты испытаний с позиций кинетической концепции разрушения. Подход С.Н. Журкова требует развития, когда в напряженном состоянии есть напряжения с разными знаками, или сложное напряженное состояние. Эти проблемы общие для подхода Журкова, в ряде работ предлагается заменить одноосное напряжение на интенсивность на-

пряжений, есть разные варианты этой замены. Это конечно означает, что небезупречна теория Журкова, но факт, что это принятая широко распространенная концепция и она дает, безусловно, знание о разрушении.

В диссертации также развивается современный подход исследования разрушения, основанный на использовании нелокальных критериев прочности.

Диссертация изложена на 273 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, 3 приложений и списка литературы из 285 наименований, отражающего современное состояние тематики работы.

Во введении определен предмет исследования диссертации, обоснована актуальность темы, формулируются цель, задачи и научная новизна исследования, изложены научные положения, защищаемые автором. В первой главе представлен обзор литературы, посвященной современному состоянию исследований процесса разрушения. Основные результаты изложены в главах 2–4.

Во второй главе изложен кинетический термофлуктуационный подход к разрушению твердых тел, развитый школой Журкова С.Н., применительно к разработке методов определения характеристик длительной прочности хрупких сред и в первую очередь горных пород. Определен диапазон применения формулы Журкова при нормальных условиях, который ограничивается безопасным напряжением, уровень которого диссертанту удалось оценить, путем введения в кинетическое уравнение баланса напряженных связей слагаемого, учитывающего процесс восстановления разорванных связей. Уровень безопасного напряжения составляет 10-20% временной прочности на разрыв для металлов и солей. Предложен и апробирован на образцах горных пород разной крепости метод определения параметров уравнения долговечности, основанный на регистрации зависимости разрывных напряжений от скорости нагружения в широком диапазоне изменения последней. Диссертантом получены данные о прочности хрупких материалов и горных пород разной крепости при испытании образцов этих сред на растяжение, изгиб и сжатие, что позволило сделать важный научный и практический вывод о независимости начальной энергии активации разрушения от вида напряженного состояния. Для начальной энергии активации разрушения предложен способ ее оценки из независимых испытаний на трещиностойкость.

Третья глава посвящена проблеме разрушения хрупких сред в неоднородных полях растяжения. Обращение к этой теме продиктовано практической потребностью определения прочности горных пород на растяжение. Так как определение этой характеристики прямым одноосным растяжением связано с большими техническими трудностями, развиваются различные косвенные методы ее определения. Чаще всего из-за простоты подготовки образцов или геометрии испытаний используются схемы, в которых реализуется неоднородное растяжение. Многочисленные испытания показывают значительно большие величины расчетных растягивающих напряжений, чем измеренная в однородном поле прочность данных сред, тем самым, ставя под сомнение применение традиционных локальных критериев прочности в данном случае. Рассмотрено применение разных вариантов нелокальных критериев прочности к разрушению хрупких материалов и горных пород в таких условиях. Обработка данных экспериментов по разрушению балок на трех- и четырехточечный изгиб, а также по разрушению кернов с осевым отверстием по моделям, использующим нелокальный подход к разрушению, позволяет согласовать величины максимальных напряжений, полученные из данных испытаний с прочностью среды измеренной при однородном растяжении.

В четвертой главе, посвященной разработке метода определения трещиностойкости горных пород, выполнено исследование разрушения компактного квадратного образца клином. Предложенная модель разрушения образца, основанная на квазистатическом приближении, позволила разработать методику определения трещиностойкости хрупких сред в статическом и динамическом режиме. Предложенный оригинальный способ обработки, основанный на методе податливости, позволил определять поверхностную энергию разрушения по двум параметрам: усилию внедрения и длине трещины. Приведено численное решение задачи о напряженно-деформированном состоянии образца с разрезом, имитирующим трещину, которое позволило определить коэффициент интенсивности напряжений в вершине разреза при внедрении в него жесткого клина. Проведено сравнение результатов измерений по предложенным методикам и численного решения с данными экспериментального определения коэффициентов интенсивности напряжений, выполненного с помощью оптического метода каустики. Анализ

разрушения клином позволил соискателю разработать рекомендации по увеличению эффективности клиновидных ударников породоразрушающего инструмента.

Обоснованность результатов исследования базируется на корректном применении современных методов физического эксперимента, корректном использовании методов механики сплошной среды. Обработка большого количества экспериментов проведена с применением корректных методов математической статистики. Экспериментальные и численные результаты, полученные в работе, не противоречат опубликованным, экспериментальным и расчетным данным других авторов.

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

1) Разработан метод определения параметров кинетического уравнения долговечности С.Н. Журкова. Это позволило определить величины начальной энергии активации разрушения при изгибе, растяжении и сжатии горных пород разной крепости. Показана независимость начальной энергии активации разрушения от вида напряженного состояния для пород, с прочностью на сжатие более 130 МПа;

Определен уровень безопасного напряжения, который ограничивает применение формулы долговечности при низких напряжениях;

2) Развита методика определения прочности на одноосное растяжение по результатам испытаний на изгиб и трещиностойкость, и из испытаний по разрушению цилиндрических образцов с малым осевым отверстием, позволяющий учесть структуру испытываемой среды;

3) Предложена оригинальная методика определения как статической, так и динамической трещиностойкости хрупких сред, основанная на регистрации двух параметров при разрушении образца жестким клином: усилия внедрения и длины трещины, проведенные численные расчеты и многочисленные эксперименты показали ее эффективность.

Замечания по диссертации:

1. В работе используется метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать возникновение микродефектов. Этот метод на совре-

менном этапе исследований по разрушению широко применяется для детализации процесса образования микротрещин. В работе он используется только для подтверждения факта образования трещин, нет детализации этого процесса.

2. В работе введен структурный параметр среды, определяемый через макроскопические характеристики разрушения. Однако связь этого параметра с размером зерна, характеристиками микротрещин и пор, подробно не исследована.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела.

Основное содержание диссертации отражено в 27 публикациях в отечественных научных журналах, из которых 18 входят в перечень ВАК. Работа была апробирована на российских конференциях с участием иностранных ученых и симпозиумах различного уровня.

Диссертационная работа Ефимова В.П., представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная научная и практическая проблема развития методов испытаний, направленных на получение физических и механических параметров, характеризующих разрушение хрупких сред и горных пород, имеющая важное народно-хозяйственное значение.

Диссертационная работа Ефимова Виктора Прокопьевича «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов» является законченным научным исследованием, соответствует критериям, установленным в разделе II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842 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.

Официальный оппонент,

Советник РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, академик РАН, доктор физико-математических наук (01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела), профессор



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

14.10.2016 г.

Подпись советника РАН, академика Б.Д. Аннина
заверяю

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН

к.ф.-м.н.



И.В. Любашевская