

## О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации Ефимова Виктора Прокопьевича «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

**Актуальность темы диссертации.** Экспериментальное исследование механического поведения материалов при различных условиях нагружения, определение свойств и параметров, характеризующих протекающие в твёрдых телах процессы деформирования и разрушения, является важной составляющей частью такого раздела науки, как механика деформируемого твёрдого тела. Результаты экспериментальных исследований являются основой для разработки математических моделей механического поведения материалов и конструкций и служат критерием их адекватности.

Механические свойства структурно-неоднородных материалов, к которым относятся, в том числе, горные породы и геоматериалы, подвержены сильному влиянию масштабного фактора, т.е. существенно зависят от нагруженного объёма. Наиболее сильно масштабный эффект проявляется в условиях концентрации напряжений, когда эффективный нагруженный объём определяется зоной концентрации напряжений, размер которой мал по сравнению с размерами образцов, на которых обычно определяют стандартные механические свойства материала. Поэтому для корректного определения физических параметров, характеризующих разрушение горных пород в неоднородных полях напряжений необходимо применять нелокальные критерии разрушения (интегральные, градиентные, а также критерии линейной механики разрушения). Но механические свойства материалов зависят не только от пространственных, но и от временных градиентов напряжений, т.е. от скорости нагружения. Поэтому для их корректного определения необходимо также использовать модели, устанавливающие связь между свойствами материала и временем нагружения.

Представленная к защите диссертационная работа посвящена разработке методов определения физических параметров, характеризующих разрушение горных пород, конструкционных и модельных материалов в неоднородных полях напряжений и при различных скоростях нагружения, основанных на

применении нелокальных критериев разрушения и кинетической концепции прочности, что определяет её несомненную актуальность.

**Структура и содержание работы. Научная новизна. Значимость результатов исследований для науки и практики.**

Диссертационная работа состоит из четырех глав, заключения, списка используемой литературы, трех приложений, содержит 273 страницы машинописного текста, 79 рисунков, 33 таблицы.

**В первой главе** приводится краткий литературный обзор работ, посвящённых исследованию влияния временных и пространственных характеристик поля напряжений на механическое поведение хрупких сред. Основное внимание автор уделит обсуждению кинетической концепции прочности С.Н. Журкова и различных нелокальных и градиентных критериев разрушения, а также методов измерения трещиностойкости материалов.

Отмечается, что современные физические и механические модели деформирования и разрушения твёрдого тела основаны на представлении о структурированной среде, в которой происходит накопление повреждений с их последующей локализацией в некоторых объёмах и образованием макротрещин, развитие которых приводит к глобальному разрушению. Важной характеристикой такой среды является структурный параметр материала, который может быть оценен через параметры макроскопического разрушения, а именно, через предел прочности (временное сопротивление) и трещиностойкость материала. С учётом структурного фактора должны разрабатываться и методы определения физических параметров, характеризующие разрушение структурно-неоднородных материалов, в том числе, горных пород. На основе проведённого анализа автор формулирует цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методов определения параметров длительной прочности хрупких материалов и горных пород. Описание длительной прочности проводится на основе кинетической концепции прочности С.Н. Журкова, основное положение которой сводится к известному уравнению долговечности, содержащему ряд физических параметров, характеризующих процесс разрушения в результате накопления в твёрдом теле разорванных структурных связей. Предложенные автором методы экспериментального определения параметров уравнения долговечности С.Н. Журкова основаны на проведении механических испытаний образцов горных пород в широком диапазоне скоростей нагружения и последующем анализе и математической обработке результатов определения прочности

образцов. Сформулированы и обоснованы технические требования к проведению испытаний и подготовке образцов горных пород.

Получены новые данные о прочности горных пород и геоматериалов различного типа, подверженных изгибу, раскалыванию и сжатию, при изменении скорости нагружения. Анализ полученных экспериментальных данных позволил сделать важный вывод о независимости начальной энергии активации разрушения при различных способах нагружения для крепких горных пород, демонстрирующих хрупкий характер разрушения. Этот результат имеет большое значение для понимания кинетической природы разрушения крепких горных пород. Вместе с этим, автор не ограничился рассмотрением только класса крепких горных пород, а включил в круг своих исследований также модельные геоматериалы и породы, демонстрирующие в большей или меньшей степени пластические свойства. Анализ результатов испытаний таких материалов позволил определить границы применимости разработанного метода.

Автором подробно и обстоятельно рассмотрен очень важный с научной и практической точки зрения вопрос о безопасном уровне напряжений. Путём введения в кинетическое уравнение дополнительного слагаемого, учитывающего рекомбинацию разорванных связей, и используя концентрационный критерий разрушения, удалось получить оценку уровня безопасного напряжения для некоторых металлических и неметаллических материалов.

**Третья глава** посвящена разработке методов определения статической прочности при растяжении горных пород. Определение этой характеристики для хрупких материалов прямым методом связано с большими техническими трудностями, поэтому развиваются косвенные методы, такие, как испытания образцов на изгиб или на раскалывание. В этих методах используют образцы различной геометрической формы, а также различные способы приложения изгибающих моментов или сосредоточенных сил. При этом в испытуемом образце реализуется неоднородное, а в некоторых случаях ещё и сложное напряжённое состояние. Даже если материал при прямом испытании на растяжение (разрыв) демонстрирует идеальное (или почти идеальное) линейно-упругое поведение вплоть до разрушения, а само разрушение происходит строго в сечении, перпендикулярном растягивающей нагрузке (т.е. материал можно вполне обоснованно считать хрупким, подчиняющимся первой теории прочности), разные методы дают существенно отличающиеся результаты. Для горных пород это является настоящей проблемой. Работа по унификации

различных методов определения предела прочности при растяжении, приведении их к некому эквивалентному однородному одноосному растяжению далека от завершения. В результате появляется целый набор характеристик (индексов прочности при различных видах нагружения), которые используют в практических расчётах элементов горных сооружений.

Автору удалось существенно продвинуться в решении этой проблемы. Выполнен большой объём экспериментальных и расчётно-теоретических работ по исследованию характеристик разрушения различных горных пород и модельных геоматериалов в испытаниях на изгиб призматических образцов и в испытаниях на раскалывание по образующей дисковых образцов (бразильский тест). Для анализа результатов испытаний привлечён ряд нелокальных и градиентных критериев разрушения, что позволило разработать обоснованные рекомендации по их использованию при оценке прочности материалов. Такая работа проведена впервые, хотя необходимость применения нелокальных критериев обсуждается в научной литературе давно.

Для квазихрупких материалов применение нелокальных критериев явилось в определённом смысле альтернативой традиционному подходу к прочности упругопластического тела. Поэтому было интересно сопоставить полученные экспериментальные данные с результатами расчёта по упругопластической модели. Такая работа выполнена автором для оценки изгибной прочности различных пород. Показано, что для некоторых пород расчёт по модели с пластическим участком даёт хорошие результаты, согласующиеся с экспериментальными данными, но для других пород этого достичь не удалось. Получено значительное (более чем в 1,5 раза) увеличение изгибной прочности по сравнению с упругим расчётом, что не может быть объяснено в рамках традиционного подхода к расчётам на прочность. Показано, что обнаруженный эффект может быть описан в рамках структурного (нелокального) подхода. С использованием нелокальных критериев разработан экспресс-метод определения прочности на растяжение по результатам измерений изгибной прочности горных пород. Автором предложен оригинальный алгоритм определения прочности на растяжение на основе модели с “пластическим участком”, размер которого связан со структурным параметром материала. Получено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных значений.

Ещё более впечатляющие результаты применения нелокальных критериев разрушения получены при испытании дисковых образцов на раскалывание. Автор предложил модифицировать бразильский тест путём

введения концентратора напряжений в виде центрального кругового отверстия. Хотя подобные эксперименты проводились и ранее, столь обстоятельное исследование на большом количестве материалов и с привлечением различных нелокальных и градиентных критериев проведено впервые. Предложенный метод испытаний расширяет рамки применения бразильского теста на менее прочные горные породы, которые не могли быть испытаны традиционным бразильским методом из-за пластического смятия образца в области приложения нагрузки. На основании полученного обширного экспериментального материала показано, что модифицированный бразильский тест обеспечивает получение более стабильных и надёжных данных, уменьшается количество отбракованных образцов, что имеет большое практическое значение.

**Четвёртая глава** посвящена разработке методов определения трещиностойкости хрупких материалов и горных пород. Автором детально рассмотрена задача о внедрении жёсткого клина в компактный образец квадратной формы. Разработана модель расклинивания образца, основанная на рассмотрении сил взаимодействия клина и образца как сосредоточенных. Модель позволяет адекватно описать процесс разрушения компактного образца. Численно решена задача об определении напряженно-деформированного состояния образца с разрезом, нагружаемого сосредоточенными силами, действующими со стороны клина на образец у основания разреза. Теоретические расчеты и проведенные эксперименты позволили определить матрицу податливостей квадратного образца, что в конечном итоге дало возможность измерять удельную поверхностную энергию разрушения всего по двум регистрируемым величинам: усилию внедрения клина и длине трещины. Анализ разрушения компактного образца позволил разработать практические рекомендации по выбору угла заточки клина и повышению эффективности работы породоразрушающего инструмента.

Суммируя изложенное выше можно сказать, что разработанные в диссертации экспериментальные методы определения физических параметров разрушения хрупких материалов, в том числе горных пород, алгоритмы обработки результатов и полученные данные являются новыми, они важны для понимания процессов деформирования и разрушения материалов и представляют несомненный интерес для исследователей в области механики деформируемого твёрдого тела. Содержание диссертации соответствует указанной специальности. Разработанные методы имеют также большое

практическое значение для решения задач проектирования и оценки долговечности и надёжности горных сооружений.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Этим вопросам в работе уделено большое внимание. Прежде всего, необходимо отметить глубину теоретической проработки поставленных в работе задач. Разработанные автором экспериментальные методы основаны на всестороннем изучении проблемы, предварительной оценке различных факторов, которые могут повлиять на результат измерения. Это даёт основание говорить о корректности поставленных задач и достоверности полученных результатов. Поскольку значительную часть работы занимает физический эксперимент, автор большое внимание уделил статистической обработке полученных данных, на основании которой также можно судить о достоверности и надёжности результатов, сделанных на их основе выводов и сформулированных рекомендаций.

Необходимо отметить большую аналитическую работу, проделанную автором по результатам проведённых экспериментов. Выявляя общие закономерности механического поведения исследованных материалов, автор не пренебрегает отдельными результатами, которые не укладываются в общую картину, а находит им разумные объяснения, опираясь на дополнительно проведённые исследования. Примером может служить критический анализ предварительных результатов определения начальной энергии активации разрушения гипса. Использование различных приближений и допущений при анализе полученных результатов, как, например, использование принципа суммирования повреждений при оценке параметров длительной прочности, автором тщательно обосновывается.

Для анализа результатов эксперимента автор не ограничивается какой-то одной теоретической моделью, а привлекает различные подходы, и на основе проведённого критического анализа делает обоснованные выводы. Так, для анализа результатов определения изгибной прочности образцов горных пород привлечены такие разные подходы, как модель упругопластического изгиба, статистическая теория прочности Вейбулла, нелокальные критерии разрушения.

Эти примеры свидетельствуют о том, насколько ответственно автор относится к выполнению работы и анализу полученных результатов, поэтому обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений.

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации.**

Оппонент считает необходимым отметить логичное построение и хорошее оформление диссертации, соответствующее установленным требованиям. Материал изложен ясно, результаты сопоставления данных теоретического анализа и эксперимента наглядно проиллюстрированы. Автореферат и публикации отражают основные положения и содержание диссертации.

### **Замечания по работе.**

1. Автор даёт математическое (формальное) объяснение смещения кривой долговечности на рисунке 5 по сравнению с расчётом по формуле С.Н. Журкова, но физическое объяснение этому факту не приводит.

2. Также не приведён окончательный вид полученного автором уравнения долговечности, учитывающего рекомбинацию связей.

3. Для построения зависимостей прочности материалов (в том числе, демонстрирующих выраженные пластические свойства) от скорости нагружения испытания проводились в режиме жёсткого нагружения, но необходимого обоснования выбора такого режима нагружения не приводится.

4. Говоря о модификации метода “бразильской пробы” введением концентратора напряжений в виде осевого отверстия, автор не уточняет, в чём состоит отличие от использования подобных образцов в других работах (например, в работе, приведённой в списке литературы под номером 127).

**Заключение.** Диссертация В.П. Ефимова «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов» является научно-квалификационной работой, в которой осуществлено решение актуальной научной и прикладной проблемы, связанной с развитием методов испытаний и определением физико-механических свойств горных пород, конструкционных и модельных материалов и имеющей важное хозяйственное значение. На основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения материалов и горных пород, в том числе в неоднородном поле напряжений, разработаны новые методы расчётно-экспериментального определения свойств материалов, установлены новые закономерности их деформирования и разрушения, позволяющие прогнозировать длительную и статическую прочность, что имеет важное значение для решения задач проектирования и оценки долговечности и надёжности горных сооружений. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при дальнейшем исследовании физико-механических свойств хрупких и квазихрупких

материалов, разработке соответствующей нормативной документации и в проектно-конструкторской практике. Сделанные выше замечания нисколько не умаляют общей положительной оценки диссертационной работы.

На основании изложенного полагаю, что диссертация «Разработка методов определения физических параметров, характеризующих разрушение хрупких материалов» соответствует критериям, установленным в разделе II Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, в части, касающейся учёной степени доктора наук, а её автор, В.П. Ефимов, достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией механики геоматериалов федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, доктор технических наук (01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры), старший научный сотрудник

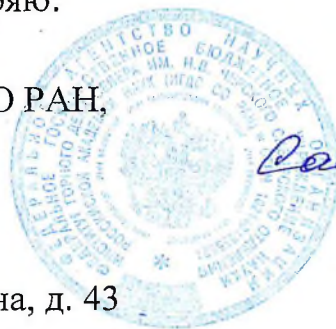


Сукнёв Сергей Викторович

23.09.2016 г.

Подпись С.В. Сукнёва заверяю:

Учёный секретарь ИГДС СО РАН,  
кандидат технических наук




С.И. Саломатова

Почтовый адрес:

677980, г. Якутск, пр. Ленина, д. 43

Телефон: (4112) 390694

E-mail: [suknyov@igds.ysn.ru](mailto:suknyov@igds.ysn.ru)