

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Пантелеева Ивана Алексеевича "Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы исследований

Диссертационная работа Пантелеева И.А. посвящена **актуальной** теме – разработке новой обобщенной модели неупругого деформирования природных хрупких материалов, учитывающей ориентационные эффекты развития поврежденности и уплотнения, проявляющиеся в индуцированной анизотропии механических свойств, а также способов экспериментальной верификации модели, базирующихся на проявлении направленного эффекта Кайзера в горных породах и результатах определения механизмов источников акустической эмиссии. Актуальность данной тематики обусловлена необходимостью обеспечения геомеханической безопасности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, разработке и добычи полезных ископаемых различного типа, базирующейся на оценке механического состояния и прогнозе механического поведения горных массивов. В свою очередь фундаментом для оценки и прогноза поведения элементов горных массивов, в том числе в сложных геологических условиях, являются макроскопические механические модели, описывающие неупругое деформирование горных пород и геосред в условиях непропорциональных трехмерных конфигураций приложенных нагрузок. Большинство инженерных подходов, используемых в геомеханике, оперируют скалярными параметрами, отвечающими за деградацию механических и прочностных свойств. При этом наличие первичной микротрещиноватости, вызванной геологическими процессами формирования горных пород, и активное развитие вторичной микротрещиноватости, связанной с антропогенным воздействием на геологическую среду (горный массив), определяют неизотропное деформационное поведение это класса материалов и направленный характер развития несплошностей (пор и микротрещин) в их объеме. В этой связи разработанную обобщенную нелинейную пороупругую модель деформирования хрупкого пористого материала, являющуюся одним из основных результатов настоящей работы, можно охарактеризовать как **научное достижение**.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, списка литературы, включающего 564 цитируемых источника. Работа содержит 365 страниц текста, в том числе 144 рисунка и 5 таблиц и 186 формул.

Краткий анализ содержания работы

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическая значимость и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты исследования локализации деформации в горных породах с использованием метода корреляции цифровых изображений образцов в ходе проведения испытаний. После краткого обзора пространственно-временных форм локализации деформации в твердых телах (включая горные породы), обнаруженных в лабораторных экспериментах, описания основных сведений о «медленных» деформационных волнах в земной коре и подходах к описанию их возникновения и распространения, приведены результаты двух групп оригинальных экспериментов. Первая группа направлена на исследование пространственно-временных форм локализации деформации при прямом одноосном растяжении сильвинита. Вторая группа посвящена физическому моделированию формирования и развития сдвиговой зоны в модели континентальной литосферы (слое водной пасты монтмориллонитовой глины).

Во второй главе приведены результаты исследования механизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе на основе анализа тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Глава начинается с подробного обзора методов анализа импульсов акустической эмиссии, возникающих при деформировании и разрушении хрупких материалов в лабораторных экспериментах. Приводятся основные понятия и базовые соотношения для тензора сейсмического момента. В приближении дальнего поля, в приближении бесконечного полупространства, равных зависимостей компонент тензора сейсмического момента от времени получено соотношение, связывающее амплитуду нормальной компоненты смещения в точке установке датчиков акустической эмиссии и компоненты тензора сейсмического момента. Разработанные теоретические представления применяются к анализу данных акустической эмиссии, зарегистрированной в эксперименте по трехточечному изгибу образцов гранита. Предложен трехстадийный алгоритм выбора устойчивых решений для механизмов акустической эмиссии, приведены результаты определения механизмов источников акустической эмиссии.

Третья глава посвящена результатам изучения условий проявления эффекта Кайзера (эффекта памяти) при циклическом непропорциональном сжатии образцов песчаника. Приведен литературный обзор проявления эффекта Кайзера в горных породах при различных условиях нагружения, а также теоретических представлений о механизмах этого явления. Далее представлена методика проведения экспериментов по нагружению образцов песчаника и результаты регистрации акустической эмиссии, возникающей при трех

циклическом трехосном сжатии по разным непропорциональным траекториям. Показано, что проявление эффекта Кайзера возможно только в случае неизменности ориентации эллипсоида приложенных напряжений от цикла к циклу. Также продемонстрировано, что на проявление эффекта Кайзера не влияет уровень интенсивности касательных напряжений в образце.

В четвертой главе диссертации представлена формулировка нелинейной реологической модели деформирования хрупкого тела с тензорной поврежденностью, являющейся обобщением нелинейной упругой модели деформирования хрупкого тела предложенной академиком РАН В.П. Мясниковым.

В начале главы приведен краткий обзор особенностей деформирования структурно-неоднородных хрупких материалов и теоретических подходов к их описанию. Далее вводится тензор поврежденности второго ранга, главные значения которого определяют изменение эффективной площади поперечных сечений в трех ортогональных направлениях, совпадающих с главными направлениями этого тензора. Получены кинетические уравнения для компонент тензора поврежденности и тензора необратимой деформации, и показано, что в процессе неравнокомпонентного деформирования исходный изотропный материал становится ортотропным, упругие свойства которого зависят от вида напряженного состояния и уровня поврежденности в ортогональных направлениях. Выведены локальные условия выпуклости потенциала, обеспечивающие единственность решения статической задачи теории упругости. Далее приводятся описания процедуры и результатов идентификации и верификации модели, выполненных по данным традиционного и истинного трехосного сжатия песчаника Darley Dale.

Предложенная модель использована для решения двух задач о формировании микротрещиноватости в хрупком теле при его одноосном сжатии с боковым подпором: об изменении ориентировки вторичной трещиноватости, определение оптимальной ориентации зоны локализованной поврежденности и ориентации микротрещиноватости внутри нее.

В пятой главе модель деформирования хрупкого материала с тензорной поврежденностью обобщается на случай учета направленного уплотнения пористого пространства. В начале главы приведен краткий обзор особенностей деформирования хрупких пористых материалов с акцентом на снижении эффективной прочности такого класса материалов при высоких уровнях среднего напряжения, приводящем к замыканию предельной поверхности в области больших давлений. Далее вводится понятие тензора уплотнения, предложено кинетическое уравнение для его компонент, описывающее экспоненциальную релаксацию деформации уплотнения до равновесного значения. На основе экспериментальных данных по циклическому сжатию песчаника, представленных в третьей главе, проведена идентификация и верификация модели тензорного уплотнения. Далее тензор

уплотнения наряду с тензором поврежденности и степенью насыщения флюидом рассматривается как независимый тензорный параметр. Представлены основные этапы построения модели деформирования хрупкого пористого материала с тензорными поврежденностью и уплотнением, результаты ее идентификации и верификации по данным трехосного непропорционального циклического сжатия образцов песчаника Darley Dale. Показано, что предложенная модель позволила соискателю описать проявление эффекта Кайзера при нагружении хрупкого пористого материала.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Новизна и практическая значимость полученных результатов

Проведенные исследования отличаются комплексным теоретико-экспериментальным подходом и являются достаточно уникальными. Под руководством автора и при его непосредственном участии был получен ряд результатов, обладающих несомненной новизной, среди которых можно выделить следующие:

- 1) На основе анализа оптических изображений поверхности деформируемых образцов установлены сценарии развития форм локализации деформации в слое водной пасты монтмориллонитовой глины при сдвиге основания и в сильвините при его прямом одноосном растяжении. В случае водной пасты обнаружены «медленные» деформационные волны, впервые установлены закономерности их распространения и взаимодействия с разрывными структурами различного ранга.
- 2) Реализованы оригинальные уникальные эксперименты по циклическому трехосному сжатию песчаника. Установлены условия проявления эффекта Кайзера при изменении ориентации, формы и размеров эллипсоида приложенных напряжений от цикла к циклу.
- 3) Разработан новый трехступенчатый алгоритм уточнения найденных и отбраковки неустойчивых решений для тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. На основе предложенного алгоритма показано, что изгиб гранита сопровождается формированием и развитием микротрещин нормального отрыва с дополнительной сдвиговой составляющей различной интенсивности.
- 4) Построена и верифицирована новая нелинейная модель деформирования хрупкого тела, описывающая развитие анизотропной поврежденности. Предложено обобщение модели на случай учета направленного уплотнения пористого хрупкого тела. Показано, что обобщенная модель позволяет адекватно описать направленный характер проявления эффекта Кайзера при циклическом трехосном непропорциональном сжатии песчаника.

Разработанные модели, изложенные в диссертации, могут быть использованы для геомеханического моделирования горнотехнических процессов, в которых анизотропный характер уплотнения и накопления поврежденности является ключевым фактором, обуславливающим вариацию механических и прочностных свойств, анизотропию проницаемости, теплопроводности и электропроводности. Предложенная и апробированная методика определения микромеханизмов деформирования и разрушения хрупких пород на основе восстановления компонент тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии может быть использована как новый инструмент для контроля отдельных элементов шахтных полей при локальном геоакустическом мониторинге.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту

Применение автором современных высокоточных экспериментальных методов и общепринятых методик анализа полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о достоверности представленных результатов. Достоверность полученных теоретических результатов в диссертации подтверждена корректной постановкой задач, математически обоснованными методами решения, качественным и вполне количественным соответствием полученных решений с экспериментальными данными как полученными самим соискателем, так и данными других авторов.

Вопросы и замечания к работе:

1) В работе утверждается, что предлагаемая модель в частном случае совпадает с моделью пороупругости Био. При этом в предлагаемой модели, отсутствует поровое давление, создаваемое жидкостью. Возможен ли учет жидкости в предлагаемой модели?

2) В работе показано, что рост поврежденности приводит к тому, что исходно изотропный материал становится анизотропным. Близкие результаты были получены в работах М.Л. Качанова, В.А. Кузькина и Р.Л. Лапина, где трещиноватая структура материала моделировалась явно методом граничных элементов. Было бы интересно провести сравнение результатов, полученных при явном и неявном учете трещин.

3) Из работы не вполне ясно, каких физические механизмы вызывают распространение "медленных волн", рассматриваемых в первых частях диссертации. Можно ли объяснить появление данных волн в рамках моделей поврежденности, развиваемых во второй части диссертации? Почему распространение локализации деформаций имеет волновой характер?

Указанные замечания в целом носят характер уточнений и пожеланий не влияют на общую положительную оценку данной работы, выполненной на мировом научном уровне.

Заключение

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной теме и выполненной на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют как научный, так и практический интерес, соответствуют паспорту специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела». В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики деформируемого твердого тела и теоретической геомеханики. Результаты работы опубликованы в ведущих журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, представлены на крупных российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержимое диссертации.

Диссертационная работа И.А. Пантелеева «Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021) и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям (п. II.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней), а ее автор Пантелеев Иван Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

Директор Высшей школы теоретической механики и математической физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор РАН

Кривцов Антон Мирославович

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

E-mail: akrivtsov@bk.ru

Тел.: +7(812) 2909872

Подпись А.М. Кривцова заверяю:

Инспектор отдела кадров

