

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Лисовенко Дмитрия Сергеевича на диссертацию Пантелеева Ивана Алексеевича «**Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации**», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 - «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность работы

Благодаря полезным ископаемым человек получает энергию (нефть, газ), строительные материалы и материалы для промышленной переработки и дальнейшего производства. Наличие полезных ископаемых требуется во всех важных сферах человеческой жизни. Их наличие решает многие экономические проблемы в государстве. Одной из важных задач является развитие новых подходов и технологий добычи полезных ископаемых, включая добычу на больших глубинах, морском и океаническом шельфе, в сложных геологических условиях и в удароопасных районах. В частности, актуально становится разработка новых геомеханических моделей, требующих расширения представлений о механизмах и закономерностях деформирования горных пород при произвольных, в том числе сложных условиях нагружения. В результате возрастает актуальность экспериментальных и теоретических исследований деформирования горных пород при монотонных и циклических непропорциональных трехосных нагрузках с учетом как ориентационных эффектов развития поврежденности, приводящих к индуцированной поврежденностью анизотропии свойств, так и направленного уплотнения, связанного с эволюцией порового пространства.

Диссертация Пантелеева И.А. посвящена разработке модели деформирования хрупких горных пород, описывающей ориентационные эффекты развития поврежденности и уплотнения при трехосном нагружении, и способов ее экспериментальной верификации, базирующихся на проявлении направленного эффекта Кайзера в горных породах и результатах определения механизмов источников акустической эмиссии.

Краткий анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы диссертационной работы и 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 исследований форм локализации деформации в горных породах с использованием метода корреляции цифровых изображений, выполненных на экспериментальной базе ИМСС УрО РАН (г. Пермь) и Института земной коры СО РАН (г. Иркутск).

В первом разделе дан краткий обзор пространственно-временных форм локализации деформации в твердых телах (включая горные породы), обнаруженных в лабораторных экспериментах.

Во втором разделе первой главы приведены основные сведения, методы регистрации и подходы к описанию распространения «медленных» деформационных волн в земной коре.

В третьем разделе первой главы приведены результаты исследования форм макролокализации деформации при квазистатическом одноосном прямом растяжении сильвинита с использованием метода корреляции цифровых изображений. Для реализации прямого растяжения было использовано специальное реверсивное устройство.

В четвертом разделе приведены результаты физического моделирования процесса формирования сдвиговой зоны в модели континентальной литосферы с использованием метода корреляции цифровых изображений. Модельный материал (водная паста монтмориллонитовой глины) выбирался согласно критерию подобия, включающего коэффициенты подобия модели и натурального объекта по вязкости, плотности, размерам и характерному времени. Физическое моделирование формирования сдвиговой зоны осуществлялось на специализированной установке «Разлом».

Во второй главе приведены результаты исследования микромеханизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе на основе анализа тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии.

В первом разделе второй главы приведен обзор подходов к определению типа источника акустической эмиссии (АЭ) при деформировании материалов, включающих методы, базирующиеся на анализе огибающих сигналов АЭ, на спектральном анализе сигналов АЭ, кластерном анализе параметров АЭ, а также сейсмологические методы.

В втором разделе второй главы приведены 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 уравнение для нахождения амплитуды нормальной компоненты смещения в точке установки датчика АЭ через компоненты тензоры сейсмического момента. Введена классификация источников АЭ по типу деформации, основанная на соотношения шаровой (ISO) и сдвиговой (DC) части тензора сейсмического момента. Получены соотношения, позволяющие определить направление подвижки (вектор смещения берегов) и нормаль к плоскости разрыва (трещины), через главные оси тензора сейсмического момента.

В третьем разделе второй главы приведены результаты исследования микромеханизмов разрушения гранита при трехточечном изгибе по данным АЭ.

В третьей главе представлены результаты исследования особенностей проявления эффекта Кайзера при циклическом непропорциональном сжатии песчаника с изменением ориентации, размеров и формы эллипсоида приложенных напряжений. Приведен литературный обзор проявления эффекта Кайзера в горных породах при различных условиях нагружения, а также теоретических представлений о механизмах этого явления. Представлено описание выбранного материала, условий проведения экспериментов и полученных результатов для различных программ нагружения. Приведены результаты циклического всестороннего сжатия песчаника с постоянной скоростью нагрузки/разгрузки. Также представлены результаты циклических испытаний песчаника с изменяющимся уровнем девиаторных напряжений.

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

В первом разделе четвертой главы приведен краткий обзор особенностей деформирования структурно-неоднородных хрупких материалов и теоретических подходов к их описанию. Отмечено, что развиваемые теоретические подходы сфокусированы на отдельных аспектах деформирования и накопления повреждений в хрупких материалах, подчеркнута актуальность развития обобщенных моделей.

Во втором разделе четвертой главы приведены основные этапы построения модели деформирования и накопления повреждений в хрупком материале. Вводится параметр поврежденности в виде симметричного тензора второго ранга, главные направления которого задают направления ортотропии материала, а главные значения определяют изменение эффективной площади поперечных сечений, перпендикулярных к каждой из осей ортотропии.

Третий раздел четвертой главы посвящен определению необходимых и достаточных условий локальной выпуклости потенциала энергии упругой деформации анизотропного поврежденного материала. Приводится описание процедуры и результатов идентификации и верификации модели. Дано описание выбранного песчаника Darley Dale и условий проведения экспериментов по его трехосному традиционному и истинному сжатию. Выбранный песчаник имеет напластования и является в исходном состоянии трансверсально-изотропным материалом, что было учтено при формулировке определяющих соотношений. Использованные для идентификации экспериментальные данные включают кривые «напряжение-деформация» для продольной и поперечной деформации, зависимость суммарного счета от времени, временные вариации скоростей продольных волн параллельно и перпендикулярно напластованию. Приведены результаты идентификации параметров модели по данным традиционного трехосного сжатия песчаника Darley Dale.

В пятом разделе четвертой главы приведены результаты использования разработанной модели для решения двух задач об ориентации микротрещиноватости в хрупком твердом теле при его традиционном трехосном сжатии. Первая задача посвящена оценке степени разориентировки исходной трещиноватости и скорости роста вторичной трещиноватости. Вторая задача посвящена определению оптимального с точки зрения максимума диссипации энергии угла наклона зоны локализованной поврежденности и ориентации трещиноватости внутри нее.

В пятой главе представлено обобщение нелинейной реологической модели деформирования хрупкого материала с тензорным параметром поврежденности на случай учета направленного уплотнения пористого пространства.

В первом разделе пятой главы приведен краткий обзор особенностей деформирования хрупких пористых материалов. Акцентировано внимание на снижении эффективной прочности таких материалов при высоких уровнях среднего напряжения, приводящем к замыканию предельной поверхности в области больших давлений.

Во втором разделе пятой главы для описания направленного уплотнения пористого материала предложено обобщение закона Ати на случай учета компонент девиатора эффективных напряжений. Введено понятие тензора уплотнения, след которого отражает текущую пористость материала. Предложено кинетическое уравнение для компонент тензора уплотнения, описывающее экспоненциальную релаксацию деформации уплотнения до равновесного значения при неизменном приложенном напряжении. На основе

экспериментальных данных по циклическому сжатию песчаника, представленных в третьей главе, проведена идентификация и верификация модели тензорного уплотнения.

В третьем разделе пятой главы представлены основные этапы построения модели деформирования хрупкого пористого материала, являющейся обобщением пороупругой нелинейной модели со скалярными параметрами поврежденности и пористости.

В четвертом разделе пятой главы представлены результаты идентификации и верификации модели деформирования хрупкого пористого материала по экспериментальным данным циклического традиционного сжатия песчаника Darley Dale с вращением эллипсоида приложенных напряжений. В приближении исходного изотропного состояния песчаника определены параметры модели. Показано, что нелинейная пороупругая модель с тензорными поврежденностью и уплотнением позволяет удовлетворительно описать не только ветви нагрузки в каждом цикле, но и ветви разгрузки.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и обладающие новизной:

1) Одноосное растяжение сильвинита, согласно результатам анализа серии оптических изображений свободной поверхности, сопровождается локализацией деформации в форме эквидистантно расположенных неподвижных зон, между которых материал находится в недеформированном состоянии. При достижении критического уровня приложенных напряжений деформирование материала продолжается в одной из неподвижных зон в режиме с обострением.

2) Формирование сдвиговой зоны в модельном материале сопровождается генерацией и распространением «медленных» деформационных волн со скоростями на два порядка выше скорости смещения активного штампа. Развитие разрывных структур приводит к фрагментации волновых фронтов и их трансформации в неподвижные фронты локализованной деформации, оконтуривающие отдельные объемы материала.

3) Предложенный для определения механизмов источников акустической эмиссии метод, основанный на нахождении и уточнении компонент тензора сейсмического момента, позволяет изучать механизмы разрушения хрупких материалов при их квазистатическом деформировании по данным акустической эмиссии.

4) При непропорциональном трехосном нагружении песчаника эффект Кайзера наблюдается в случае неизменности ориентации и формы эллипсоида приложенных напряжений от цикла к циклу. В противном случае проявление эффекта зависит от величины и соотношения накопленных деформаций относительного растяжения в трех ортогональных направлениях.

5) Разработанная нелинейная модель деформирования хрупкого тела с тензорным параметром поврежденности позволяет описать анизотропный характер развития поврежденности при трехосном непропорциональном сжатии материала.

6) При одноосном сжатии с боковым подпором хрупкого материала оптимальной, с точки зрения скорости диссипации энергии, ориентацией зоны локализованной деформации является наклон к оси активного сжатия под углом близким к углу Кулона-Мора. Степень близости определяется степенью анизотропии поврежденности. Внутри зоны оптимальными конфигурациями являются вертикально ориентированная трещиноватость и трещиноватость, ориентированная относительно направления зоны локализованной поврежденности под углом близким к углу Кулона-Мора.

7) Обобщение нелинейной модели деформирования хрупкого тела на случай учета тензорного уплотнения позволяет описать направленное упрочнение пористого материала, определяющее направленный характер проявления эффекта Кайзера в песчанике при его циклическом трехосном сжатии с вращением эллипсоида приложенных напряжений.

Практическая значимость работы заключается:

- 1) В возможности использования разработанных моделей для геомеханического моделирования горнотехнических процессов, в которых анизотропный характер уплотнения и накопления поврежденности является ключевым фактором, обуславливающим вариацию механических свойств, анизотропию проницаемости, теплопроводности и электропроводности.
- 2) В применении предложенной методики определения микромеханизмов деформирования и разрушения хрупких пород на основе восстановления компонент тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии. Данная методика может быть использована как новый инструмент для контроля отдельных элементов шахтных полей при локальном геоакустическом мониторинге.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту

Применение автором высокоточных экспериментальных техник и общепринятых методик анализа полученных экспериментальных данных, позволяет сделать вывод о достоверности представленных в диссертации результатов. Достоверность полученных аналитических результатов в диссертации подтверждена корректной постановкой задач, математически обоснованными методами решения, сравнениями результатов с известными решениями.

Результаты, полученные автором, обладают несомненной значимостью, как с фундаментальной, так и практической точек зрения, так как вносят существенный вклад в механику геосред.

Замечания по диссертации:

- 1) На стр. 212 приведена формула для энергии упругой деформации анизотропного поврежденного материала (4.19). После самой формулы написано, что «Первое слагаемое в (4.19) представляет собой энергию деформирования исходного неповрежденного изотропного материала...» Отмечу, что запись первого члена соответствует энергии для анизотропного тела, а не изотропного тела.
- 2) На стр.213-214 приведены формулы упругих модулей, зависящих от главных поврежденностей Ω_i , вида напряженно-деформированного состояния и величины приложенных главных деформаций. Далее указано, что «Другими словами, приложение нагрузки к исходно изотропному материалу, сопровождающееся появлением и развитием микротрещин, приводит к анизотропии (в общем случае ортотропии) его упругих свойств.». Если предположить, что в начальный момент отсутствует поврежденность ($\Omega_i = 0$), то матрица упругих модулей соответствует материалу с кубической анизотропией, а не изотропному материалу, т.е. не выполняется условие изотропности $C_{44} = 0.5(C_{11} - C_{12})$. Также можно отметить, что ортотропия не является общим случаем анизотропии.
- 3) В формуле (4.19) на стр.212 используются тензорные упругие модули C_{ijkl} , а на стр.213-214 выписаны выражения для матричных упругих модулей C_{nm} . В диссертации не указывается каким образом был совершен переход от тензорных упругих модулей к матричным.
- 4) На стр.239 приведена матрица жесткости (4.41). При описании данной матрицы указано, что она соответствует трансверсально-изотропному материалу. На самом деле

эта матрица соответствует частному случаю трансверсально-изотропного материала, а не общему случаю трансверсально-изотропного материала.

5) В диссертации и автореферате присутствуют опечатки.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы.

Заключение

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой 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 твёрдого тела». Выносимые на защиту положения прошли достаточную апробацию и были опубликованы в 16 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в Web of Science и Scopus. Автореферат полно отражает основные результаты диссертации.

Считаю, что диссертация «Деформирование горных пород и геосред: анализ развития анизотропной поврежденности и локализации деформации» полностью соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Пантелеев Иван Алексеевич, несомненно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 - «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент:

Заведующий лаборатории механики
технологических процессов
Института проблем механики
имени А.Ю. Ишлинского РАН,
Доктор физико-математических наук,
профессор РАН
«19» сентября 2022 г.

Лисовенко Дмитрий Сергеевич

Контактные данные:

Телефон: +7(495) 433-34-96

email: lisovenk@ipmnet.ru

Адрес места работы:

Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем механики им.

А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

Телефон: +7(495) 434-00-17

Сайт: <https://www.ipmnet.ru>

Подпись Д.С. Лисовенко заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН

кандидат физико-математических наук



Михаил
9.09.22

Котов Михаил Алтаевич