

Механизмы разрушения горных пород и твердофазный массоперенос в трещинах

С. М. Никитин, Д. С. Буянова
Московский государственный горный университет, Москва

archont@mail.ru

Приводятся результаты экспериментальных наблюдений эффектов выброса и массопереноса продуктов дробления, генерируемых в зонах предразрушения вершин трещин. Кинематика процессов твердофазного массопереноса рассматривается на основе инвариантного Г-интеграла Черепанова, как следствие проявлений сильно возбужденных состояний в кристаллах гетерогенных горных пород. Делается вывод о возможности генерации продуктов разрушения в трещинах по механизму фазового взрыва.

Ключевые слова: Геомеханика, трещина, фазовый взрыв, нелинейная механика разрушения.

Ссылка: Никитин, С. М., Д. С. Буянова (2012), Механизмы разрушения горных пород и твердофазный массоперенос в трещинах. *Вестник ОНЗ РАН, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG.*

Широко развитые исследования минеральных равновесий при высоких термодинамических параметрах, требующие громоздкого и уникального оборудования, связанные с необходимостью создания в замкнутом объеме высоких давлений и температур, практически отодвинули на второй план сравнительно недорогие эксперименты с образцами горных пород, выполняемые на современных испытательных машинах.

Между тем, реализуемые при этом возможности исследования поведения минеральных систем в открытых условиях обращают внимание на ряд кинематических эффектов, сопровождающих процессы разрушения горных пород в условиях катаклаза. Этот процесс, аналогичный структурной сверхпластичности металлов и сплавов, целиком связан со структурной трансформацией дефектной фазы в горных породах при их переходе в запредельное состояние. В его основе, также как и дрейф дислокаций в кристаллах, лежат процессы экструзии и интрузии раздробленной горной массы, стимулированные ростом и движением трещин.

Актуальность исследований процессов твердофазного массопереноса в горных породах обусловлена как практическими, так и фундаментальными проблемами, решение которых оказывается возможным только на междисциплинарном уровне.

В практическом смысле это касается пылеподавления и проветривания горных выработок. Столь же полезно знание этих процессов при решении вопросов управления горным давлением при разработке угольных и рудных месторождений в связи с внезапными выбросами угля и газа. С выбросами большого количества пыли также связывают катастрофические массовые горные удары.

Горный удар, как правило, сопровождается также хрупким разрушением и выбросом в горную выработку и более крупных блоков и кусков угля (пород) из кровли или бортов, что происходит с взрывоподобным и сильным звуковым эффектом. Причиной этого явления, связанного с неустойчивостью прилегающего к горной выработке массива, считается разрушение предельно напряженной горной породы в окрестности контура образованного обнажением при проходке. Поэтому исследования и прогнозы горных ударов сводятся в основном к анализу и контролю напряжений и деформаций, причем критерием удароопасности служит прочность пород в предельном состоянии, чаще всего по Кулону-Мору.

Систематические наблюдения последствий горных ударов, рис. 1, локализованных в зонах тектонических нарушений, в условиях стратиграфических несогласий в залегании пластов пород, позволяют вместе с тем обратить внимание на необходимость дополнительного учета и целого ряда кинематических явлений, связанных с неуправляемым перемещением разрушенной и раздробленной горной массы. Причины такого перемещения скрыты в процессах твердофазного массопереноса в трещинах.



Рис. 1. Обрушения в горных выработках
Верхнего оловорудного месторождения в
Приморье.

В фундаментальном аспекте, в связи с этим, вызывают интерес последние достижения в области термодинамической теории фазовых переходов и топохимии поверхностей раздела. Характерное для последнего времени отсутствие достаточно полной теории разрушения и прочности твердых тел компенсируется при этом разработками в области структурной сверхпластичности с использованием калибровочных теорий [Панин и др. 1990]. Вместе с тем не теряет своей актуальности и теория Гриффитса, широким применением которой горные породы обязаны своей хрупкости.

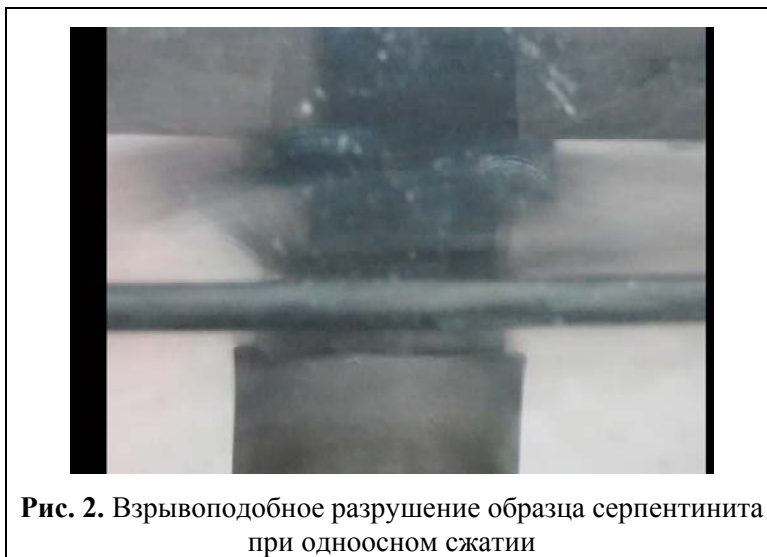


Рис. 2. Взрывоподобное разрушение образца серпентинита
при одноосном сжатии

Целью настоящего исследования является разработка на основе этих теорий методов и средств моделирования кинематических явлений, сопровождающих трещинное разрушение геоматериалов и горных пород и руд.

Объектом исследования служили образцы горных пород разных петрографических типов, включающие известняки, мрамор, обсидиан, серпентинит, гранит, доломит и принадлежащие к разным генетическим классам.

Междисциплинарный подход к исследованиям выражался в необходимости использования ряда методов, включающих помимо прессовых испытаний образцов - призм кубической и цилиндрической формы по схемам одноосного сжатия и растяжения, размером 40x40x40мм, трехточечного изгиба балочек, размером 20x40x100мм, для определения параметров трещиностойкости. Были использованы также возможности методов испытаний в замкнутом объеме дробленой горной породы по схеме цилиндр-поршень. Контроль

результатов экспериментов выполнялся с использованием оптической и электронной микроскопии путем анализа распределения минеральных частиц на поверхности скола. Строение и раскрытие минералов оценивалось методами фрактографического анализа морфоструктуры поверхностей скола с учетом петрографии образцов. Кинематические явления при разрушении и росте трещин регистрировались скоростной фотосъемкой.

Идеология исследований строилась исходя из условий подобия форм и механизмов разрушения образцов горных пород в лабораторных и элементов горных конструкций в естественных условиях.



При испытаниях в условиях одноосного сжатия использовалась мягкая схема нагружения, позволяющая интенсифицировать рост трещин и способствующая их развитию в форсированном режиме. При этом, в зависимости от физико-механических свойств горных пород наблюдалось или взрывоподобное разрушение, сопровождаемое звуковым эффектом и разлетом осколков, или катаклаз в режиме структурной сверхпластичности.

В режиме катаклаза выброс частиц в мраморе, известняке и травертине наблюдался в виде свободных высыпаний, сопряженных с дроблением образца и формированием преимущественно крупноблочной структуры разрушения. При этом образец в определенной степени сохранял свою форму вследствие зацепления поверхностей скола между частицами крупных фракций. Более мелкая пылеватая фракция либо осыпалась с поверхности образца, либо заполняла вскрывающиеся трещины.

В форсированном режиме дробление образца гранита, серпентинита и обсидиана сопровождалось разлетом частиц, причем было отмечено, что при этом наряду с траекториями нормальными к поверхности образца существуют траектории, характерные для движения вихревого типа, рис.2.

Очевидно, что вихревой характер разрушения обусловлен структурой поля остаточных или индуцированных нагрузочной системой напряжений, релаксация которых приводит к поворотным модам деформаций. Однако, вихревой характер движения частиц, источником которых следует считать трещины скольжения, выглядит весьма необычно, поскольку такие трещины не имеют раскрытия и существуют в поле касательных напряжений. Их реализация в металлах связывается с развитием систем скольжения Чернова-Людерса. Надо полагать, что в горных породах такие трещины являются причиной возникновения зеркал скольжения на

НИКИТИН И ДР.: МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

поверхностях блоков естественной отдельности. Тем не менее, разрушение горных пород в условиях мягкого нагружения сопровождается развитием и трещин скольжения и отрыва.

Если следовать теориям континуального разрушения, то следует признать, что трещины сдвига наиболее способны к оказанию консолидирующего воздействия, так как способствуют процессам внутреннего трения. При этом для разрушения вновь возникающих поверхностей требуется гораздо больше энергии, нежели для разрушения реальной дефектной среды.

Исследование процессов нарушения сплошности гетерогенных образований типа горных пород требует в силу иерархичности их строения обратить внимание на процессы, связанные с поворотами элементов неоднородности и напряжениями, развитыми на разных структурных уровнях.

При рассмотрении процессов деформирования кристаллов выделяют только четыре масштабных уровня [Владимиров, 1987], повреждения которых определяются атом-вакансионными дефектами (микроуровень, $L_a < 0.1$ мкм), законами движения дислокаций (мезоуровень, $L_m = 0.1-2.0$ мкм), поведением фрагментов кристаллов (субзеренный уровень, $L_f \sim 2-10 L_m$), взаимоотношениям между зернами ($L \sim dz$) и взаимоотношениями между их агрегатами (суперструктурный уровень, $L_c = 2-10dz$). Разрушение на всех структурных уровнях определяется величиной критической концентрации дефектов, причем роль среды начинает проявляться после накопления дефектов достаточных для перехода в квазиоднородное состояние. При деформировании горных пород иерархия их структуры становится более сложной, обусловленной ролью структурно-текстурных особенностей и генезисом [Кнотт, 1979].

Изгибные испытания балочек выполняли на прессе INSTRON 300DX, что предполагало использование теории хрупкого разрушения для определения удельной энергии расходуемой при росте трещины и расчета коэффициентов интенсивности напряжений K_1, K_2, K_3 в кончиках трещин, причем в качестве основного критерия принимали Γ -интеграл Черепанова-Эшелби-Райса. Его особенностью является возможность учета кинематики трещинного разрушения [Керштейн и др., 1989].

Предусматриваемый этим критерием вклад в разрушение кинетической энергии также позволяет наряду с ростом трещин рассматривать особенности массопереноса образующихся продуктов дробления.

Структура поверхности разрушения анализировалась в связи с результатами контроля нагрузочно-деформационных характеристик роста трещины в режиме циклического нагружения. При этом для получения представлений о строении поверхности разрушения стекла, как материала Гриффитса, используемого в качестве опорного материала, анализировалась поверхность сколов в обсидиане, дефектное строение которого видно при небольших увеличениях в оптическом диапазоне.

Сравнительный фрактографический анализ поверхностей берегов трещин, выращенных при мзгибе балочек, с привлечением результатов исследованием структуры приконтактной зоны дробления, образованной при сжатии горных пород в замкнутом объеме, позволил выявить некоторые общие черты механизма разрушения в связи с процессами гетерогенного структурообразования.

Поверхность разрушения гранита имеет резко выраженное гетерогенное строение, представленное округлыми поверхностями концентрической формы, центр которых располагается в полости полусферической формы, которую можно рассматривать в качестве зародыша пор, рис.4.

Область вокруг такой поры представлена округлыми сколовыми образованиями, в объеме имеющими вид тора или на поверхности валика округлой формы. При этом торообразные структурные элементы по-разному, пересекая друг друга, ориентированы относительно нормали к поверхности разрушения.

Структура поверхностей скола в обсидиане представлена элементами трещин, траектории которых имеют характер геодезических кривых, направления которых контролируются порами и газовой-жидкими включениями. Вскрытие последних приводит к возникновению перенапряженных состояний в кончике трещины, о чем свидетельствует появление на поверхности скола кратерообразных кольцевых структур, рис.5.

Сравнение со структурой зоны приконтактного дробления, полученной при испытаниях в камере цилиндр-поршень позволяет заметить, что указанная особенность проявляется и в

окрестности новообразующихся пор при консолидации дробленого материала в стесненных условиях. Характер распределения продуктов разрушения, частиц разной крупности, в зоне контакта позволяет отметить закономерное увеличение их размеров от центра к периферии поры, что указывает на существенную роль электромагнитных факторов, т.е. заряда частиц, в процессах агрегации осколков. При этом пора, как известно не обладающая собственным полем механических напряжений, играет роль стока энергии.

В данном случае теоретический аппарат нелинейной механики разрушения с использованием контурного Г-интеграла [Черепанов, 1983], позволяет учитывать в структуре поля напряжений немеханические формы энергии, что необходимо при построении теорий движения особенных элементов (источников и стоков, пор, вихрей, дислокаций и фронтов трещин) неоднородности дефектной фазы.

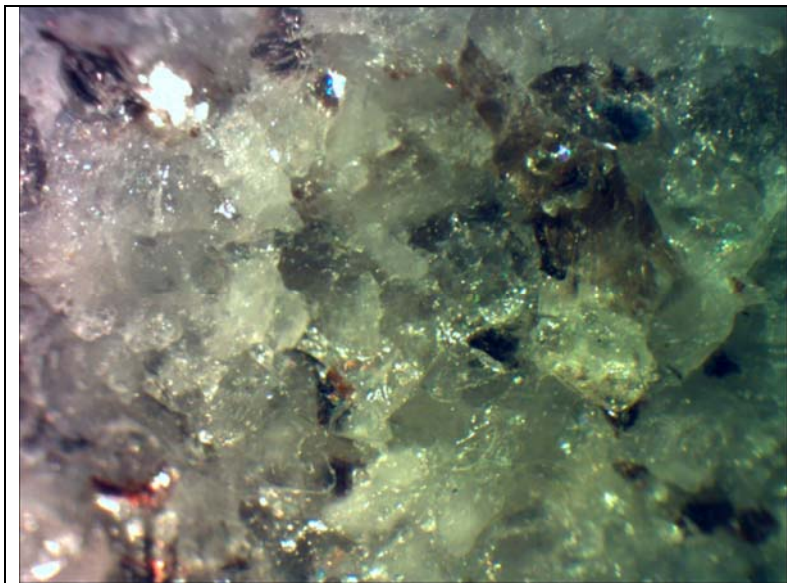


Рис. 4. Межкристаллитное очаговое разрушение вокруг поры (темное в центре). Ув.х40.

Эксперименты, выполненные при определении трещиностойкости и удельной поверхностной энергии разрушения мрамора, известняка, гранита и серпентинита по схеме трехточечного циклического изгиба призматических образцов обращают внимание на зарегистрированные впервые проявления твердофазного массопереноса, синхронного с ростом трещин. Выбросы материала происходят в виде выстрелов в связи с движением и развитием протяженной зоны предразрушения перед кончиком трещины, причем раскрытие берегов трещины явно запаздывает, рис.3.

Обращает на себя внимание также особенность формирования зоны предразрушения в окрестности вершин трещин. Здесь в максимальной степени проявляются процессы микродробления, однако активация твердофазного массопереноса, как кинетического явления, носит ограниченный характер, обусловленный конкуренцией раскрытия трещины (как процесса образования новой поверхности) и её роста, как процесса тонкой структурной трансформации вещества в зоне предразрушения.

Таким образом, можно констатировать наличие двух механизмов массопереноса частиц, отличающихся своей интенсивностью:

- поверхностная генерация, при которой вынос частиц происходит при запредельном деформировании (кривизне) берегов открывающихся трещин;
- объемная генерация, источником частиц которой служит зона предразрушения в кончиках трещин,

Очевидно, что их соотношение определяется свойствами горных пород и зависит от реакции вещественного состава в его взаимоотношениях с дефектами. Интенсификация перемещений дефектов в перенапряженных условиях и сопровождается выносом микро- и наночастиц, предвосхищающим раскрытие трещины.

Петрографический анализ структуры разрушения дробленого риолита позволил отметить, что в формирующихся каналах, трещинного типа, которые по мере сжатия трансформируются в поровое пространство, проявляется асимметрия полостей трещин, одна из вершин которых служит аккумулятором микрочастиц,

Отмечен также и трансляционный характер формы каналов, представленный периодическим повторением подобных асимметричных трещин вдоль магистральной трещины более низкого порядка. Очевидно, что в квазиравновесных условиях в горных породах устойчивостью обладают трещины конечных размеров и таким образом проявляющийся дрейф трещины может рассматриваться в качестве трансляционного механизма твердофазного массопереноса.

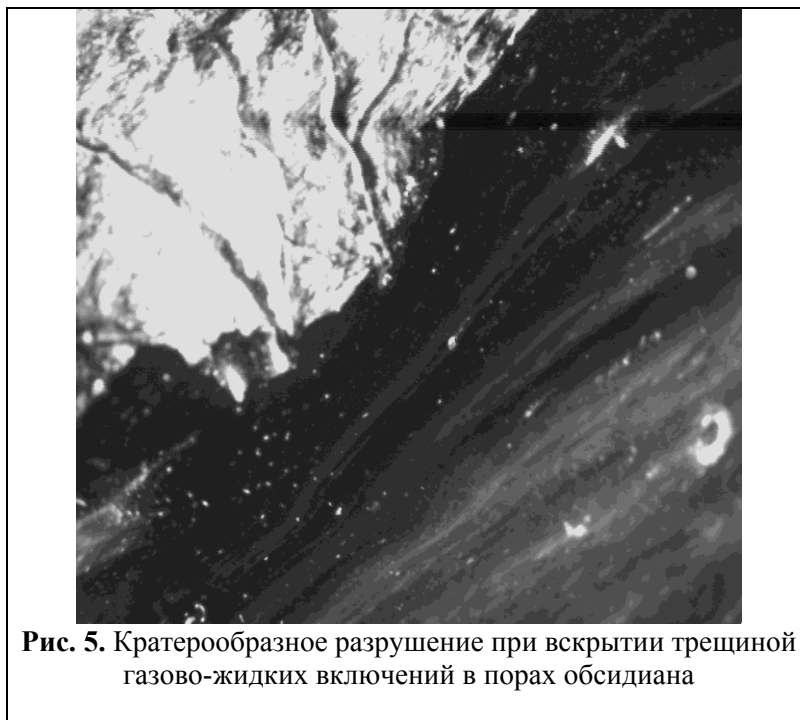


Рис. 5. Кратерообразное разрушение при вскрытии трещиной газовой-жидких включений в порах обсидиана

В заключение можно отметить, что формирование дефектной фазы в горных породах сопровождается самоорганизацией структурных элементов, носящей характер междууровневой иерархии. Вследствие этого помимо вещественной неоднородности возникают структурные элементы, обусловленные взаимодействием дефектов разных типов. Такие образования определяют форму частиц при разрушении и структуру поверхностей скола: - сферы, кольцевые структуры, торы, блоки и т.п. Их активизация под действием внешних нагрузок приводит к возникновению неоднородностей напряженного состояния, требующего перемещения дефектов (дрейфа дислокаций, трещин) и в конечной стадии создающего условия для твердофазного массопереноса в виде выброса частиц горных пород при их разрушении.

Выполненные оценки энергетического баланса с учетом анализа кратерообразной формы разрушения окрестности газовой-жидких включений в обсидиане по трассам трещин, позволяют рассматривать в качестве основного механизма разрушения фазовый взрыв [Мартынюк, 1999].

Реализацией последнего также объясняется переход материала в запредельное состояние, что экспериментально подтверждается актами локального разрушения горных пород, катакластически текущих при сбросе нагрузки во время испытания образцов на прочность в режиме одноосного нагружения.

Локальность условий возникновения высокотемпературных состояний при росте трещин, связанная с возникновением на контактах их берегов высоких давлений и температур, способствует реализации переходов структурно-фазового типа и определяет свойства дефектной фазы горных пород и руд, наблюдаемые в виде аномалий нагрузочно-деформационных характеристик. Поэтому в перспективе, для количественной оценки установленных явлений, целесообразно проведение комплексных исследований термодинамических систем типа горных пород и руд при высоких PT параметрах в установках

НИКИТИН И ДР.: МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

высокого давления наряду с исследованиями их поведения в открытом состоянии в обычных атмосферных условиях на стандартных испытательных машинах.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект 10-08-00331.

Литература

Владимиров, В. И. (1987). Коллективные эффекты в ансамблях дефектов, *Вопросы теории дефектов в кристаллах*, Л.: Наука, сс. 43-67.

Керштейн, И. М., В. Д. Ключников, Е. В. Ломакин, С. А, Шестериков (1989). *Основы экспериментальной механики разрушения*, М.: Изд-во Моск.ун-та, 140с.

Кнотт, Дж. (1979)ю Микромеханизмы разрушения и трещиностойкость конструкционных сплавов, *Механика разрушения. Разрушение материалов*, М. Мир, сс.40-82.

Мартынюк, М.М.(1999) Фазовые переходы при импульсном нагреве. –М. Изд-во РУДН. - 332с.

Панин, В. Е., Ю. В. Гриняев, В. И. Данилов и др.(1990). *Структурные уровни пластической деформации и разрушения*, Новосибирск: Наука, Сиб.отд., 255с.

Черепанов, Г. П. (1983). *Механика разрушения композиционных материалов*, М.: Наука, 296 с.