

ПРИЧИНЫ ИНВАРИАНТНОСТИ В МЕХАНИЗМЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассматриваются причины подобия в механизмах деформирования и разрушения горных пород. Приводятся доводы в пользу волновой природы формирования деформационных структур.

Анализ экспериментальных данных по вариации среднего размера структур, полученных при взрывном разрушении горных пород различной прочности, отразил свойство среды формировать структуры с одинаковой кратностью линейного размера [1]. Аналогичная картина наблюдается при дроблении пород и руд в процессе их дезинтеграции – продукт дробления по крупности, при одинаковом приложении нагрузки, не зависит от прочности породы. То есть при разрушении твердого тела наблюдается определенная структурная организация в виде образования элементов соизмеримого друг с другом размера. На иерархичность в структурах разрушения ранее обращали внимание и другие исследователи [2-4]. Похоже, что процесс разрушения анизотропной среды подчиняется определенному механизму. По мнению некоторых исследователей [5,6] в этом процессе действует принцип «свободного разрушения», когда отношение величин удельной поверхностной энергии γ к плотности потенциальной объемной энергии A создает условие для образования структуры критического размера $d_{кр}$:

$$d_{кр} = \gamma/A.$$

При этом, размер тела, отделяемого от основного объема, превосходит критический размер в 3 раза, а суммарная энергия разрушения пропорциональна натуральному логарифму отношения критических размеров двух смежных масштабных уровней:

$$\Sigma E \sim \ln (d_k/d_{k+1});$$

В основу такой модели положен принцип инвариантности, основанный на структурной дискретности деформируемого анизотропного тела. При нагружении тела по контуру дискретных структур происходит концентрация напряжений, приводящих к разрушению и накоплению дефектов. Статистический анализ накопления дефектов выделяет две стадии разрушения горных пород [7]. Первая стадия характеризуется дисперсным накоплением невзаимодействующих трещин, которые образуются под действием механической нагрузки. При этом размер трещин соответствует определенному размеру структурной неоднородности материала, соответствующий отношению размеров структур 1,43 [6]. Когда концентрация дефектов в локальной области достигает порогового значения, начинается ускоренное дефектообразование. Разрушение переходит на вторую, очаговую стадию. В результате развития очага разрушения, образуется дефект большего размера, соответствующий следующему масштабному уровню структуры при отношении размеров структур 1,37. Данные закономерности инвариантны масштабу процесса. Это означает, что если в материале имеет место полимодальность характерных размеров гетерогенности, как в горных породах [8], то разрушение происходит подобным образом на всех возможных масштабных уровнях.

В работе [6] выделен размер первичной структуры, которая формируется по принципу $e^\pi \approx 23$, что позволило выйти на инвариантные границы, в пределах которых в теле формируются равноразмерные структуры. Коэффициент изменения формы $i \approx 5,2$. В процессе нагружения выдерживается фрактальная кратность значения i .

Самоподобный инвариантный ряд, отражающий характер формоизменения в стадии допредельного разрушения и рисунок структур, выглядит следующим образом: $1,2 (\sqrt[4]{2})$; $1,364 (\sqrt[4]{\pi})$; $1,43 (\sqrt{2})$; $1,773 (\sqrt{\pi})$; $1,884$.

Аналогичные данные были получены в [9], в которой пороговые критерии обозначаются как значения нормированной информационной энтропии.

В [11] с помощью минералого-петрографических методов изучения вещества удалось установить ранее неизвестное явление – первичную кусковатость (или скрытую текстуру) сначала для простых по минеральному составу и генезису, а затем и для полиминеральных и сложных по генезису макроскопически однородных и нетрещиноватых горных пород. Первичная кусковатость, в отличие от текстуры горных пород, которая наблюдается невооружённым глазом, является скрытым (неочевидным) их свойством и выявляется специальными методами. По масштабу проявления она меньше или равна текстуре. Природа первичной кусковатости изучается. Ясно одно, что обнаруженное явление не подходит ни под понятие «структура», ни под понятие «текстура» горных пород. Для всех исследованных образцов горных пород наблюдались разные картины неоднородного внутреннего строения, интерпретируемые как наличие закономерных агрегатов минеральных зёрен (фрустумов – первичных кусков), разграниченных между собой системами макроскопической трещиноватости (Рис.1).

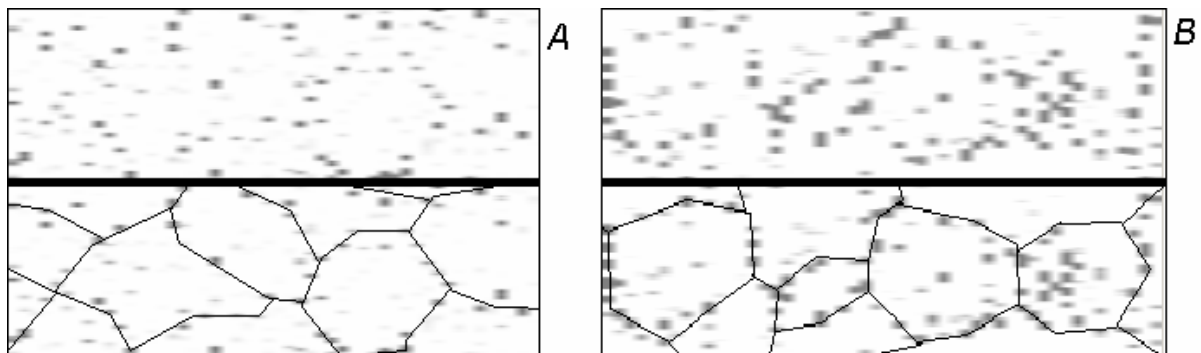


Рисунок 1. - Визуализированная методом лазерной ультразвуковой эхоскопии картина скрытой текстуры (фрустумации) мономинеральных горных пород (кибик-кордонского мелко-среднезернистого кальцит-доломитового мрамора, А; кыштымского мелко-среднезернистого гранулированного кварцита, В). Верхняя часть рисунка – исходная картина, нижняя – ретушированная.

Характерные размеры и форма фрустумов в исследованных горных породах существенно различаются. Наименьшие по числу их составляющих минеральных зерен наблюдаются в мономинеральных породах (около 20-50 зерен в сечении, площадь $1-2 \text{ см}^2$ и около 70-150 зерен в объеме), а самые крупные зафиксированы в полиминеральных породах и содержат более 1000 минеральных зерен. Авторы считают, что для описания морфологии фрустумов необходимо применять теорию фракталов. Горные породы следует представлять как результат возникновения первичных ансамблей (парагенезисов) минеральных зерен и их кооперативного поведения в отличие от представления о горной породе, как о тривиальном наборе минеральных зерен. Возможно, скрытая структура-фрустумация является макроскопической визуализацией «мозаичного равновесия» в неравновесных горных породах и дает представление не только о нижнем размерном пределе этих отдельных элементов «мозаики», но и об их форме и характере границ.

Согласно концентрационного критерия (Куксенко В.С.[7]) разрушение на любом уровне иерархии i наступает тогда, когда отношение среднего расстояния между трещинами R_i к среднему размеру трещины L_i достигает критического значения $K_{кр} = R_i/L_i \approx 2,7$. В [10] концентрационный критерий переформулирован в виде отношения $C(L) = L^3/R^3$ и определен как концентрация трещин размером L . Величину $C(L)$ можно рассматривать и как вероятность образования трещины размером L . Итак, в момент разрушения для i -того уровня иерархии вероятность появления трещины размером L_i одинакова для всех уровней иерархии $P_i = P_{кр} = K_{кр}^{-3} \approx 0,05$. Иными словами, разрушающийся материал рассматривается как простейшая иерархическая структура, в которой все уровни иерархии самоподобны. Вероятность разрушения следующего уровня иерархии при этом описывается с помощью биномиального распределения. Если в качестве физического наполнения модели выбрать эмпирическое выражение для одноосного растяжения:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp((U - \gamma\sigma)/kT),$$

где τ – долговечность образца, U – энергия активации процесса разрушения, σ – величина приложенных напряжений, T – температура, k – постоянная Больцмана, γ – параметр, характеризующий реальные механические свойства материала, τ_0 – период тепловых колебаний атомов в твердом теле,

то можно получить выражение для вероятности разрушения нулевого уровня иерархии от времени. Знание функции распределения вероятности разрушения каждого уровня иерархии в каждый момент времени позволяет рассчитывать динамику энерговыделения, неупругой деформации и среднего разрушенного объема материала.

Однако массивы горных пород находятся в сложном неравнокомпонентном и неоднородном напряженном состоянии, важной особенностью которого является стесненность. Степень стесненности во многом определяет механизм деформирования и характер разрушения среды [12-14]. Поведение иерархической, многоуровневой блочной среды в объемном напряженном состоянии во многом определяется локализацией деформации на границах раздела структурных элементов. Некоторые авторы считают [13,14], что при увеличении сжимающих напряжений в направлении сдвига происходит снижение вклада деформационных механизмов низких структурных уровней, приводящих к накоплению необратимых деформаций в межблочных интерфейсных областях. Причиной этого является увеличение степени дегградации среды в исходном напряженно-деформированном состоянии, приводящее к быстрому формированию несплошностей на наиболее ослабленных границах раздела блоков в процессе сдвигового деформирования. При больших степенях стеснения формирование таких мезоскопических несплошностей и их объединение в межблочные трещины становится доминирующим деформационным механизмом в блочной среде. Однако, как показано нами в [12], при больших сжимающих напряжениях происходит смена механизма разрушения: межкристаллитное разрушение сменяется транскристаллитным. Транскристаллитное разрушение сопровождается катаклизмом и дроблением, грануляцией, пригонкой зерен, перекристаллизацией и структурно-фазовыми переходами в более высокотемпературную модификацию. Дилатансия в породах вызвана именно этими механизмами. Дилатансия происходит только в окрестности будущих магистральных трещин и сопровождается повышением выхода мелких фракций при разрушении.

На рисунке 2 приведены данные по разрушению песчаника в объемном поле сжимающих напряжений при обобщенном сжатии. Данные приведены отдельно для шарового тензора и тензора девиатора. Из приведенных данных следует, что между средней линейной деформацией и сдвиговой деформацией существует однозначная зависимость

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{cp} i;$$

где $i = 5, 2$ - коэффициент изменения формы.

Однако, существуют напряженно-деформационные состояния, когда наблюдаются и аномально высокие деформации сдвига ($\sigma_2 = \sigma_3 = 10$ МПа).

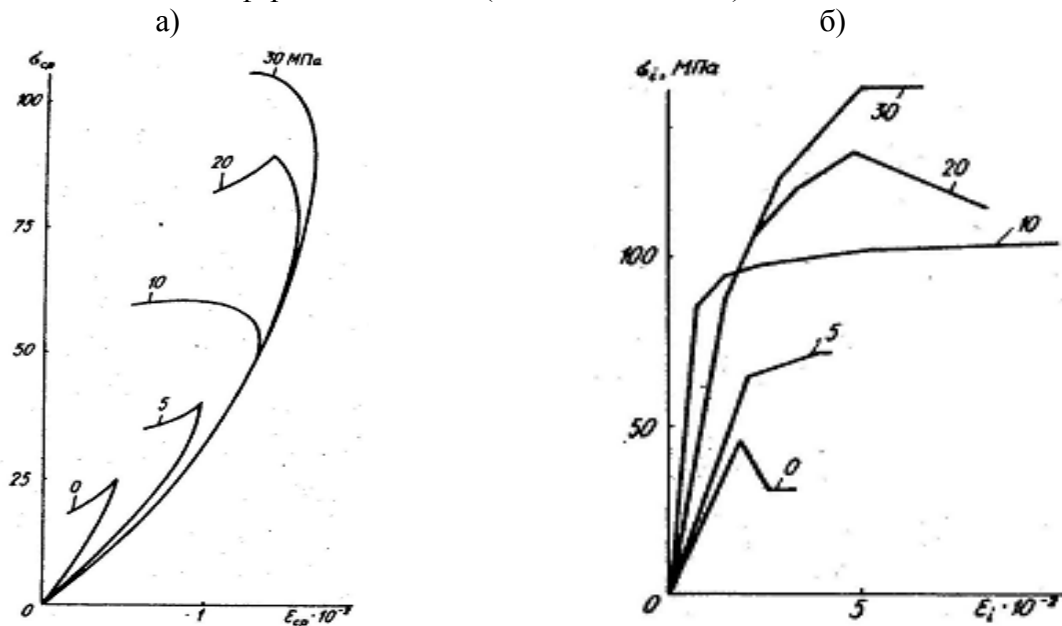


Рисунок 2 – Зависимость «среднее напряжение-средняя деформация» (а) и «девиатор напряжений-девиатор деформаций» при обобщенном сжатии песчаника $\sigma_2 = \sigma_3 = 0; 5; 10; 20$ и 30 МПа.

В связи с этим, наиболее перспективной для объяснения формирования иерархии структур является концепция атом-вакансионных состояний в кристаллах и распространения пластических волн [15-17]. В соответствии с этой концепцией в кристалле легированием, приложением механических и тепловых полей можно вызвать сильные смещения атомов из узлов решетки. При определенном уровне таких смещений кристалл переходит в двухфазное состояние: с областями высокой концентрации дефектов, чередующихся с малоискаженной кристаллической фазой. Потoki таких дефектов осуществляют массоперенос, на 10-15 порядков превышающий скорость перескоковой диффузии. В условиях сдвига устанавливается динамическое равновесие между кристаллической и аморфной фазами, поток дефектов является стационарным, что обеспечивает аномально высокие скорости массопереноса и высокую химическую активность: состояние вещества при этом подобно аморфно-кристаллической плазме.

Вследствие указанных механизмов в зонах сдвига пластическое течение носит типично турбулентный характер с образованием вихрей, воронок, трубок. Такая зона на фоне сдвигового ламинарного течения имеет вид турбулентной дорожки. Материал зоны расслаивается на отдельные подзоны, которые легко смещаются по границам разделов. В соответствии с концепцией физической мезомеханики в деформируемом твердом теле образуется вихревое механическое поле, носителями деформации в котором являются объемные мезодефекты, движение которых происходит по схеме «сдвиг + поворот». В таких условиях экспериментально наблюдаются повороты на значительные углы зерен, отдельных фрагментов, слоев, имеющих вид акустического течения при аномальных геодинимических явлениях [18].

В структурно-неоднородных средах, каковыми являются все горные породы, локализованная пластическая деформация имеет волновой характер и распространяется в виде нелинейных пластических волн [19]. Волновой характер пластической деформации и дискретный характер участков сжимающих и растягивающих напряжений приводит к метаморфической дифференциации вещества. Оценка длин волн показывает, что они связаны с характерными размерами структур различных уровней.

В [20] показано, что для каждого материала при заданных термо-динамических параметрах имеется некоторая стационарная предельная микроструктура, которая характеризуется определенной величиной фрагментов и обеспечивает материалу идеальную пластичность (деформирование без упрочнения и разрушения). Предельную структуру быстрее всего формируют те процессы, которые приводят к более сильному снижению пластичности. Если эти процессы протекают при высоких геостатических давлениях, релаксация внутренних напряжений идет по пути фрагментации, а не образования микронесплошностей. Высокое всестороннее давление повышает пластичность (величину деформации до разрушения), однако на пластичность существенно влияет также вид нагружения [12,20].

Ввиду структурной неоднородности материала его пластическая деформация как целого может осуществляться лишь путем совместной деформации отдельных структурных элементов. Структурный элемент может деформироваться произвольным образом, если в нем работает пять независимых систем скольжения. По причине взаимного упрочнения, как правило, работают максимум 2–3 системы. Поэтому по мере деформации материала происходит блокирование сдвигов в пределах структурных элементов, в результате чего растут внутренние напряжения. Внутренние напряжения существенно неоднородны. Релаксация этих напряжений возможна по двум основным путям: относительно развороту отдельных фрагментов с формированием границ разориентации и образованию зародышевых микронесплошностей. Первый путь ведет к фрагментации и упрочнению материала, второй – к росту поврежденности его структуры и снижению пластичности. Таким образом, фрагментация – неизбежная «дань», которую платит материал за сохранение своей целостности. Увеличивая всестороннее давление можно «превратить» процесс разрушения в процесс фрагментации. В горных породах фрагментация определяется внешним напряженным состоянием, и при блокировке механизмов скольжения структура теряет устойчивость с образованием складок, имеющих вид узких полос, ориентированных под определенными углами к направлениям главных напряжений. Они пересекают целый ряд зерен минералов и имеют ширину 300-500 нм. При пересечении этих полос образуются равноосные фрагменты с неравновесными большеугловыми границами, которые могут поворачиваться относительно друг друга, поэтому может наступить стадия идеальной пластичности.

Таким образом, фрагментация горных пород на различных масштабных уровнях обусловлена распространением нелинейных деформационных волн различной длины (частоты). Собственные колебания Земли под действием приливных сил порождают единую систему стоячих геодинамических волн. Система общеземных стоячих волн и формируемые на их основе гармоничные создают упорядоченные интерференционные решетки (волны сжатия-растяжения), на базе которых возникают сначала геодинамические зоны в виде неравновесных большеугловых границ и фрагментов, способных поворачиваться друг относительно друга, а затем и тектонические структуры. Совокупность геодинамических зон различного иерархического уровня образует геодинамическую структуру горного массива, которая имеет ячеистое

(мозаичное, решетчатое) строение. В пределах геодинамических зон могут происходить значительные сдвиговые деформации по механизму идеально пластичности.

Литература:

1. Глатоленков А.И. Физико-техническое обоснование разупрочнения массива горных пород взрывом. Вестник НАН РК, 1996, №1.- с.30-39.
2. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной массы. //ДАН СССР, 1979. Т.247, №4.- С.829-831.
3. Асатрян Х.О., Соболев Г.А. Образование иерархической структуры разрывов при деформировании высокопластичного материала. Сб. трудов «Физика горных пород при высоких давлениях». М.: 1991.-213 с.
4. Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: 1986.- 301 с.
5. Шемякин Е.И. О свободном разрушении твердых тел. //Доклады АН СССР, 1988. Т.300. –С.1090-1094.
6. Глатоленков А.И., Литовченко И.Н. Инвариантность в механизме деформирования горных пород. Сб. научн.трудов ИГД им. Д.А. Кунаева НАН РК «Научно-техническое обеспечение горного производства», 2002. Т.64.–С.53-58.
7. Kuksenko V., Tomilin N., Damaskinskaya E., Lockner D. A Two-stage Model of Fracture of Rocks //Pure Appl. Geophys. 146 (2). pp.253-263.- 1996.
8. Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Шнирман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности //Изв.АН СССР, Физика Земли, 1984. №2.- С.3-15.
9. Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б., Турмухамбетов А.Ж. Фракталы, информация, турбулентность. Алматы: 2000.- 228 с.
10. Федотов С.Н. Разрушение материалов как разрушение самоподобной структуры.//Научная сессия МИФИ. М.; МИФИ, 2008. –Т.3.- С.214-215.
11. Поваренных М.Ю., Жабин А.Г. Фрустумация (первичная кусковатость) горных пород как проявление квантования горнопородного уровня организации вещества. М.: ИМГРЭ.2006.
12. Алексеев А.Д., Рева В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. Киев: Наук. думка, 1989.-188с.
13. Николаевский В.Н. Трещиноватость земной коры как ее генетический признак //Геология и геофизика.-2006.-Т.47.-№5.- С.646-656.
14. Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А., Смолин И.Ю. О закономерностях локализации деформации в горизонтальных слоях среды при разрывном сдвиговом смещении основания //Физическая мезомеханика.-2009.-Т.12.-№1.- С.83-88.
15. Панин В.Е. Волновая природа пластической деформации твердых тел // Изв. ВУЗов. Физика, 1990.-№ 2, с. 4-19.
16. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Хон Ю.А., Елсукова Т.Ф. Атом-вакансионные состояния в кристаллах // Изв. ВУЗов. Физика, 1982, № 12, с. 5-28.
17. Попов В.Л., Панин В.Е. Фрактальный характер и масштабная инвариантность дисклинационной структуры деформируемого твердого тела // Доклады АН, 1996. Т. 352, №1, 1997. С. 51-53.
18. Шамаев В.В., Рязанцев Н.А. О природе формирования деформационных структур в массиве горных пород и их связи с аномальными геодинамическими явлениями. // Физика и техника высоких давлений, 1990.- №34.- С.46-55.
19. Егорушкин В.Е. Динамика пластической деформации // Изв. ВУЗов. Физика, 1992.- № 4, с. 19-41.
20. Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Орлов Д.В., Сынков С.Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформаций. Донецк: ТЕАН, 2003.- 87с.