

ПЛАСТИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ *

Н. А. РЯЗАНЦЕВ, А. К. НОСАЧ, кандидаты техн. наук
(Красноармейский фил. ДПИ)

Среди большинства исследователей, изучающих процесс разрушения горных пород, сложилось мнение, что с ростом всестороннего давления их прочность и пластичность увеличиваются. Однако иногда даже при довольно существенном гидростатическом давлении наблюдается хрупкое разрушение без значительных пластических деформаций, что противоречит общей закономерности. Детальных же исследований влияния всестороннего сжатия на предельную пластичность и характер разрушения горных пород недостаточно. Они проводятся, как правило, с большим шагом изменения давления, поэтому многие интересные явления, возникающие при деформировании горных пород, остаются незамеченными или считаются случайными.

Более полный экспериментальный материал имеется для металлов и сплавов, для них установлены немотонность предельной пластичности с повышением давления и аномалии пластического течения. Следует отметить, что аномалии пластичности наблюдаются по мере развития явления локализации деформации, рассматриваемой как неравномерное формоизменение, т. е. как случайный, а не закономерный физический процесс.

В отличие от металлов горные породы принято считать классическим примером хрупких дефектных тел. Под хрупкостью понимается не столько способность породы разрушаться с минимальными затратами энергии, сколько деформироваться без больших пластических деформаций. Однако поведение пород часто не вписывается в указанную схему, и при определенных термодинамических параметрах отмечаются значительные пластические деформации и вязкое разрушение. Потребовалось проведение целенаправленных экспериментов по исследованию пластических деформаций и механизмов их локализации для установления закономерностей деформирования и практической реализации полученных результатов. Деформирование и разрушение образцов горных пород и углей изучалось на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) конструкции ДонФТИ АН УССР [1]. Пластичность горных пород оценивалась по деформации сдвига на октаэдрической площадке:

$$\gamma_{ок} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ — главные линейные деформации (максимальная, промежуточная, минимальная). Фиксировались предельная (на пределе сжимаемости) и полная (разрушающая) сдвиговые деформации.

Исследования зависимости прочности и пластичности от бокового давления σ_0 проводились с шагом изменения 1—2 МПа, для чего использовались образцовые манометры с ценой деления 0,6—1 МПа. При этом пределы текучести и прочности отождествлялись с началом дилатансии (пределом сжимаемости) и максимальной величиной разрушающего напряжения σ_1 . Зависимость прочности и пластичности пород от вида деформационного состояния устанавливалась путем изменения параметра Надаи—Лоде μ с шагом [0,2]. Для каждого испытания отбиралось не менее трех образцов, отличие кажущейся плотности которых не превышало 5%.

Следует упомянуть о существовании мультимодальности в твердых телах и переходе модулей упругости от одного устойчивого значения к другому в процессе деформирования при неравнокомпонентном поле напряжений. Наблюдается последовательность фиксированных значений деформаций перехода второго рода

$$\varepsilon_N = (2/3)^{N/2},$$

где $N = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 18$ — целое число.

Детальные исследования показали, что с ростом бокового давления при обобщенном сжатии пределы сжимаемости и прочности, а также разница между ними возрастают. Дилатансионный эффект в угле с ростом бокового давления подавляется и при $\sigma_0 = 50$ МПа практически отсутствует (рис. 1). При смене вида деформационного состояния наибольшая разница между этими параметрами и максимум дилатансии характерны для обобщенного сдвига. Тем не менее уголь следует отнести к

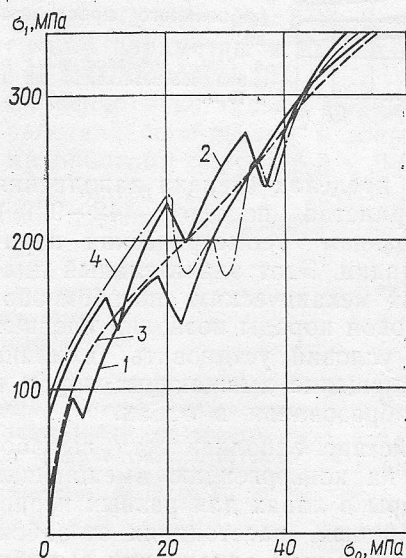


Рис. 1. Зависимость прочности горных пород σ_1 от величины бокового давления σ_0 :

1 и 2 — для угля и песчаника марки Ж; 3 и 4 — для угля и песчаника марки Г.

слабоупрочняющимся при пластической деформации материалам с дилатансией, редко превышающей 0,2—0,3%. Разрушение происходит без изменения объема либо с его уменьшением за счет «схлопывания» пор и уплотнения образца практически сразу по достижении предела сжимаемости (объемные деформации достигают 10%). Такое поведение угля, обусловленное внутренней структурой и высокой пористостью (30—40%), свидетельствует о значительной его пластичности и преимущественно сходящейся поверхности текучести.

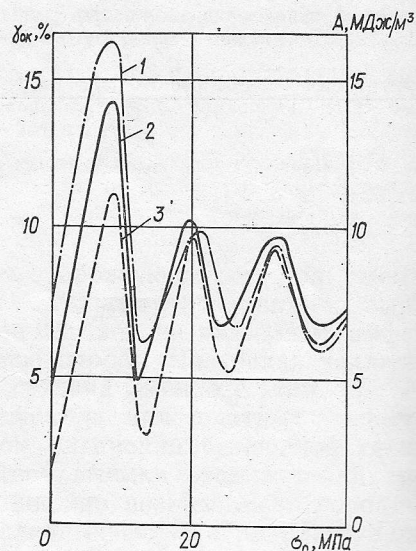


Рис. 2. Зависимость величины сдвиговой деформации на октаэдрической площадке $\gamma_{ок}$ от величины бокового давления σ_0 :

1 — для угля; 2 — для песчаника; 3 — для энергоемкости разрушения песчаника.

Напряжения сдвига в угле с ростом бокового давления быстро стремятся к предельному значению 80 МПа, а при смене вида напряженного состояния изменяются периодически, поэтому поверхность текучести походит на поверхность вращения с затухающей типа затухающей синусоиды. Деформации сдвига также изменяются периодически (период $\sigma_0 = 12$ МПа), причём

* В порядке предложения.

пределная и полная сдвиговые деформации находятся в противофазе (рис. 2). Лишь при σ_0 , равном 0,12,24 МПа, начало дилатансии практически совпадает с макроразрушением. Во всех остальных случаях от микро- до макроразрушения уголь способен выдержать степень деформации до 15%. Подобная картина наблюдается и при смене вида напряженного состояния. Так, с уменьшением величины упругой деформации возрастает разрушающая деформация и наоборот. Естественно, что и энергоёмкость разрушения угля изменяется периодически. При этом разница между предельной энергоёмкостью деформирования и полной энергоёмкостью деформирования и разрушения (энергоёмкостью дробления) — величина постоянная, равная 1,5 МДж/м³.

Для песчаника характерны в 2—3 раза меньшие объёмные деформации, способность упрочняться в процессе дилатансии и значительная ее величина. Иной и характер разрушения. Практически все образцы разрушаются с большим увеличением объёма, несмотря на то что с ростом бокового давления разрушение снижается. Пределы сжимаемости, прочности и величина дилатансии с ростом бокового давления и при смене вида деформационного состояния изменяются периодически. Для предельной сдвиговой деформации $\gamma_{пр}$ характерна четкая синусоидальная зависимость от давления. Среднее значение $\gamma_{пр} = 4\%$. Полная деформация γ_n находится в фазе по отношению к предельной и имеет вид периодической затухающей функции. Средняя величина $\gamma_n = 8\%$ (рис. 2). Энергоёмкость деформирования и разрушения песчаника также изменяется периодически, причем энергоёмкость дробления составляет 2,5 МДж/м³.

Таким образом, можно сделать вывод, что в горных породах, как и в металлах, наблюдаются аномалии прочности, пластичности и энергоёмкости разрушения. Экстремумы сдвиговых деформаций и дилатансии представляют собой закономерное периодическое изменение свойств пород при возрастании бокового давления и вариациях вида деформационного состояния. На основании полученных результатов можно утверждать, что увеличение бокового давления (возрастанию, снижению) прочности и пластичности горных пород. Это объясняется тем, что всестороннее давление, с одной стороны, усиливает межмолекулярное взаимодействие, а с другой — снижает внутреннее трение. Два механизма разрушения (отрыв и сдвиг) конкурируют один с другим. Энергия активации дефектов, возникающих по плоскостям сдвига, под действием шаровой части тензора напряжений возрастает, а под действием девиаторной части уменьшается. Если превалирует последняя, то происходит генерация и движение дефектов, пластичность возрастает. Концентрация дефектов на стыке двух ортогональных плоскостей сдвига приводит к образованию трещин Коттрелла. При энергетическом равноправии или неравноправии плоскостей наблюдается соответственно снижение пластичности (хрупкое разрушение) или ее возрастание. Во всех случаях дилатансионное разрыхление материала вызывают трещины Коттрелла.

Кроме того, отмеченные закономерности могут быть объяснены на основе учета импульсного режима работы установки УНТС. Принято считать, что испытания при низких скоростях нагружения являются статическими. Однако каждый из трех плунжерных насосов высокого давления УНТС работает в импульсном режиме и делает одно качение в секунду, т. е. частота около 1 Гц. При этом колебания давления в цилиндре и скорость движения нагружающей плиты имеют вид периодической затухающей во времени функции [2]. Колебания скорости перемещения плит отстают по фазе от давления примерно на $\pi/4$, в результате чего в образце распространяется деформационная волна и устанавливаются вынужденные колебания с частотой возмущающей силы около 1 Гц. Поскольку вынуждающие силы дейст-

вуют в трех взаимно перпендикулярных плоскостях, то внутри образца за счет отражения от границ раздела образуется сложное волновое поле. При синфазном отражении возникают стоячие волны (чередование фиксированных зон растяжения-сжатия), приводящие к локализации деформации и возрастанию ее амплитуды. В зависимости от давления в цилиндре указанные процессы могут приводить то к увеличению, то к уменьшению пластических деформаций.

С этих позиций рассмотрим некоторые аспекты локализации деформации. Учитывая результаты, полученные ранее, в данной работе авторы предлагают в качестве критерия локализации принять дилатансионное увеличение $\Delta\theta$ образца за пределом сжимаемости и степень несоответствия видов напряженного и деформационного состояний в породе. Показатель локализации может иметь вид:

$$\eta_1 = 1 - \Delta\theta/\theta,$$

где θ — относительная объёмная деформация на пределе сжимаемости.

При $\eta_1 \leq 0$ наблюдается сверхлокализация, а при $\eta_1 \rightarrow 1$ деформация однородна по всему объёму. Показатель локализации можно выразить также в виде:

$$\eta_2 = (\mu\sigma - \mu\varepsilon)^2,$$

где $\mu\sigma$ и $\mu\varepsilon$ — параметры Надаи—Лоде для напряжений и деформаций.

Тогда при $\eta_2 \rightarrow 0$ деформация однородна, а при $\eta_2 \rightarrow 4$ локализована, т. е. чем однороднее деформация, тем меньше дилатансия и тем ближе между собой значения $\mu\varepsilon$ и $\mu\sigma$, и наоборот. Эта закономерность объясняется, во-первых, тем, что дилатансия происходит в основном в окрестности будущего магистрального разрыва, остальная же часть образца свободна от дефектов и ведет себя упруго; во-вторых, тем, что в области локализации деформации ее скорость и величина на несколько порядков выше, чем средняя по образцу (скорость перемещения плит УНТС составляет $12 \cdot 10^{-8}$ м/с, а движения дефектов в плоскости сдвига — 150 м/с), т. е. деформация как бы опережает по фазе приложенную нагрузку.

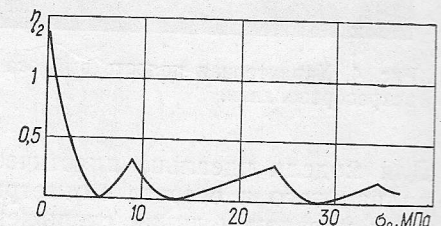


Рис. 3. Зависимость параметра локализации деформации η_2 от величины бокового давления σ_0 для песчаника.

Из зависимости $\eta_2 = f(\sigma_0)$, учитывая строго фиксированный параметр вида напряженного состояния $\mu\sigma = -1$ (обобщенное сжатие), следует, что при $\sigma_0 \rightarrow 0$ деформационное состояние соответствует области обобщенного растяжения (рис. 3). С ростом σ_0 несоответствие уменьшается и при определенных давлениях приводит к периодическому возникновению однородной деформации. Характерно, что локализация сохраняется и при других схемах нагружения и сопровождается экстремумами дилатансии, пластической деформации и энергоёмкости разрушения. На макроуровне локализация проявляется в виде линий, пачек скольжения, полос деформации и сдвига, дисклинационных сбросов, создавая на поверхности образцов пород характерный рельеф.

При развитой пластической деформации наличие коллективных форм движения линейных дефектов порождает однотипные структурные дефекты — дисклинации для разных условий нагружения и материалов. Направленное движение дисклинаций приводит к фрагментации породы; чем больше степень деформации, тем мельче фрагменты и сильнее их разворот один относительно другого. Пластические ротации сопровождают процесс деформирования вплоть до разрушения, образуя специфические текстуры деформации. Ротационные эффекты можно считать высшей степенью развития и локализации деформации, когда сдвиговые механизмы пластичности исчерпали себя и являются следствием процесса заторможенного сдвига. Для ротаций в целях описания механизма деформации недостаточно девяти компонент ее тензора, поэтому вводят еще три компо-

ненты вектора вращения. В этом случае получают уравнение движения:

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial x_i} + \sum \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + X_i,$$

где ρ — плотность породы;
 ω_i — компоненты смещения;
 i, j — оси координат;
 σ_i — компоненты нормальных напряжений;
 τ_{ij} — компоненты касательных напряжений;
 t — время;
 x_i, x_j — линейные размеры;
 X_i — вектор плотности объемных сил.

Из уравнения следует, что в среде, помимо объемного расширения и формоизменения за счет сдвига, распространяется волна искажения, связанная с вихревым движением. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в процессе пластического деформирования даже при фиксированном напряженном состоянии вектор деформации поворачивается на угол до 60° . При документировании стенок и кровли выработок после выбросов также довольно часто обнаруживаются вихревые движения в горных породах (рис. 4).

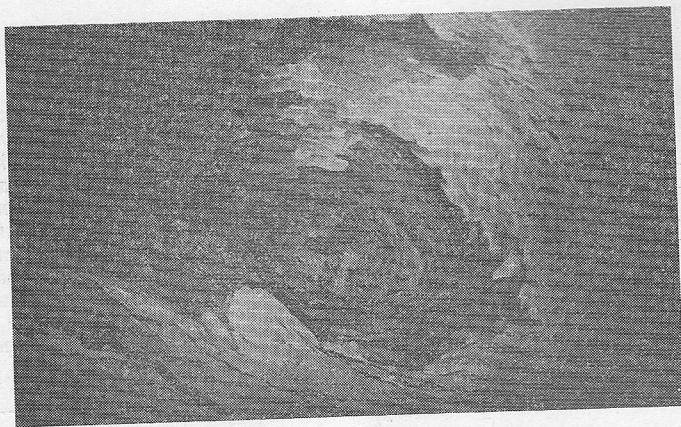


Рис. 4. Характерная полость выброса в песчанике со следами вихреобразования.

Для модели идеально пластического тела в случае радиального и осевого симметричного течения получены уравнения линий скольжения в виде семейства логарифмических спиралей, которые характерны и для трещин в пластической области при строгом использовании теории Кулона — Мора [3]. Решение стационарных уравнений Навье — Стокса для модели ньютоновской вязкой жидкости ($Re \gg 1$) показали, что из-за неограниченного роста внутренних деформаций при малых внешних первоначально близкие к полукругу области вырождаются в две спирали, вложенные одна в другую. Если вязкость стремится к бесконечности ($Re \rightarrow 0$), то кинетика течения не изменяется даже количественно. С точки зрения теории нелинейных колебаний для всех динамических систем с диссипацией энергии общим свойством является то, что единственным

устойчивым состоянием равновесия будет структура с фазовыми траекториями в виде семейства логарифмических спиралей или кривых параболического типа [4]. Скорость акустических потоков значительно ниже колебательной скорости частиц в волне, а линейный размер вихрей соотносится с длиной деформационной волны λ [3].

Указанные эффекты дифференциального вращения и направленного массопереноса, возникающие из-за локализации деформации, представляют интерес с точки зрения развития динамических процессов в шахтах. В частности, выброс можно объяснить следующим образом.

При проведении выработки вокруг ее контура возникают зоны концентрации напряжений. Если в такую зону попадает компетентный слой породы, являющийся концентратором напряжений в массиве, то в нем достигается предел текучести, происходят локализация пластической деформации и направленное движение пластически деформируемого материала в сторону обнажения. Плоскости скольжения в поперечном сечении имеют вид логарифмических спиралей, а в продольном — циклоида. Поверхность текучести, образованная циклоидами, обуславливает форму полости выброса и лежит вершиной в массиве. При подвигании выработки происходит смена вида напряженного и деформационного состояний, при этом газ поступает в трещины, раскрывающиеся по плоскостям скольжения, и создается ситуация для вязко-хрупкого перехода в породах. За счет энергии упругого восстановления вмещающих пород и расширения газа интенсифицируется массоперенос и отброс (выброс) разрушенного материала. Таким образом, выброс, по нашему мнению, — это вихрь в горном массиве.

Обнаруженные закономерности изменения пластичности горных пород и рассмотренные механизмы локализации деформации позволяют несколько иначе взглянуть на многие процессы, происходящие в горном массиве и не находящие объяснения с традиционных точек зрения, например, наличие зон дезинтеграции вокруг выработок, открытых акад. Е. И. Шемякиным, но не получивших убедительного объяснения. Считаем, что предложенная модель — это первый шаг в осмыслении достигнутых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А. Д., Ревва В. Н., Рязанцев Н. А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. — К.: Наук. думка, 1989. — 168 с.
2. Гайворонский А. Т., Лифшиц Г. И., Гумаров Г. Г. Исследование на основе имитационного моделирования динамики процесса гидропрессования в фазе стабилизации // Физ. и техн. высок. давлений. — 1989. — № 30. — С. 78—85.
3. Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. — М.: Высш. школа, 1987. — 352 с.
4. Бутенина Н. В., Неймарк Ю. И., Фуфаев Н. А. Введение в теорию нелинейных колебаний. — М.: Наука, 1987. — 384 с.

© Рязанцев Н. А., Носач А. К., 1990