

ХАРАКТЕР РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В СЛОИСТЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

К.т.н. А.К. Носач, инж. Н.А. Рязанцева, инж. Л.Л. Бачурин (Красноармейский филиал ДонНТУ),
к.т.н. Рязанцев Н.А. (ПО «Красноармейскуголь»)

Рассматриваются физические особенности процессов трещинообразования в неоднородном слоистом массиве горных пород и их влияние на изменение водопроницаемости подработанного массива при разработке угольных пластов длинными очистными забоями.

1. Физические основы разрушения неоднородных горных пород

Осадочная толща карбоновых отложений Донбасса представлена переслаиванием пород различного литологического состава: известняка, угля, глинистого и песчаного сланцев, песчаника, реже гравелита. Кроме того, внутри каждого слоя в процессе катагенеза формируются структурные блоки размером примерно в три раза больше мощности пласта.

Осадочные породы имеют очень много различных плоскостей раздела как на структурном, так и на текстурном уровнях: границы зерен, микро- и макротрещины, границы слоистости, серий, пластов, блоков и т.д.

Если на зарождение трещин в породах оказывают влияние неоднородности малого масштаба (порядка размера зерна), то на распространение трещин, как показано в [1], влияют неоднородности масштаба более 3 см, т.е. границы, серий, слоёв (пластов), блоков и т.д.

С точки зрения разрушения неоднородность горных пород характеризуется изменением физико-механических свойств. Дискретные, кусочно-неоднородные массивы характеризуются резким изменением свойств при переходе от одного слоя к другому, а также в пределах слоя между блоками.

С кинетической точки зрения разрушение твердых тел рассматривается как постепенное накопление в деформируемом объеме дефектов, который заканчивается образованием трещин критического размера, способных распространяться самопроизвольно [2]. При этом независимо от способа разрушения (химический, термический, механический), все они энергетически подобны.

Любому разрушению предшествует пластическая деформация. Энергия же пластической деформации, требуемой для создания зоны перед фронтом трещины, не зависит от механизма и условий разрушения, а определяется физико-химической природой материала и его структурой [2].

Ряд исследователей даже считают, что процесс пластической деформации и разрушения происходит за счет локального плавления либо других структурных переходов в плоскости скольжения [3 – 5]. Поэтому критерием разрушения горных пород и, одновременно, характеристикой неоднородности свойств в наиболее общем случае является удельная величина внутренней энергии, как суммы энергий всех составляющих породу частиц.

Изменение внутренней энергии под действием внешних сил и подводимого тепла можно предста-

вить в виде:

$$dU = \partial Q - \partial A,$$

где dU – изменение внутренней энергии;

∂Q – подводимое тепло;

∂A – работа внешних сил, совершаемая при деформировании горной породы.

С учетом порового давления флюида (воды, пара, газа)

$$\partial A = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} - P f d\omega,$$

где σ_{ij} – компоненты поля напряжений в горном массиве;

ε_{ij} – компоненты поля деформаций;

P – давление флюида в порах;

f – пористость породы;

ω – объёмная деформация.

Тепловой эффект пластической деформации

$$dQ = TdS - TdS_i,$$

где dS_i – возрастание энтропии при неупругом деформировании,

$$dS_i = \frac{1}{T} \sigma_{ij} \partial \varepsilon_{ij}.$$

Как показано в [6] деформация твердого тела квантована, не зависит от химической природы вещества, а только от степени возбужденности атомов, молекул и может быть представлена в виде:

– для малых деформаций

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{n - n_0}{n_0 - 0,5}},$$

где n_0, n – число фононов до и после возбуждения (деформирования);

– для больших деформаций

$$\varepsilon = \frac{3n^2 - l(l+1)}{3n_0^2 - l_0(l_0+1)} - 1,$$

где n_0, l – соответственно главное и азимутальное квантовые числа исходного состояния;

n, l – то же, деформированного состояния.

Для адиабатического процесса деформирования, когда $\partial Q = 0$, $dU = \partial A$, т.е. вся работа деформирования идет на изменение внутренней энергии.

Для изотермического процесса, вводя свободную энергию dF , имеем:

$$dF = dU - TdS.$$

Если представить свободную энергию в виде суммы поверхностей и объёмной энергии и отнести их к единице объёма породы, получим закон разрушения Ребиндера [5]:

$$W = m + \gamma_o S_V,$$

где m – удельная объёмная энергия разрушения, определяющая зарождение (активацию) трещины, Дж/м³;

γ_o – удельная поверхностная энергия разрушения, характеризующая затраты энергии на распространение трещин (образование новых поверхностей), Дж/м²;

S_V – удельная поверхность разрушенного материала, м²/м³.

С учетом локализации деформации

$$m = m_0 - \mu_\sigma A_f - \frac{A_f}{1 + \mu_\sigma^2};$$

$$m_0 = Q_o N_L \theta_V.$$

где m_0 – удельная энергия активации в отсутствие деформации, Дж/м³;

Q_o – энергия активации молекулы, Дж;

$N_L = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – число Лошмидта;

$\theta_V = 10^{-2} \dots 10^{-4}$ – величина относительного активационного объёма;

A_V, A_f – плотность энергии изменения объёма и формы соответственно;

$\mu_\sigma = \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$ – параметр вида напряженного состояния Надаи-Лоде;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

При разрушении горных пород экспериментально очень трудно разделить момент активации трещины, страгивания её с места и распространения. Поэтому для характеристики свойств пород с точки зрения трещиностойкости вводится эффективная поверхностная энергия разрушения:

$$\gamma = \gamma_o + \left[m_o - \mu_\sigma A_V - \frac{A_f}{1 + \mu_\sigma^2} \right] \frac{\Delta V}{S_H},$$

где ΔV – величина пластически деформируемого объёма (активированного объёма), м³;

S_H – величина вновь образованной поверхности, м².

Чем меньше пластически деформированный объём, тем более крупные фрагменты (блоки) породы образуются при разрушении.

Величина эффективной поверхностной энергии может характеризовать трещиностойкость макро-неоднородной (слоя, блока). Характер и механизм разрушения таких сред определяется, в основном, видом напряженного состояния.

При наличии непрерывной неоднородности (постепенное изменение свойств пород с глубиной) с увеличением величины объёмного сжатия (глубины) трещины отрыва все менее склонны к распространению, но облегчается распространение сдви-

говых трещин. Плотность плоскостей скольжения при этом растёт, наблюдается фрагментация (разделение породы на отдельные блоки, фрагменты), а при больших степенях деформации возникают ротационные эффекты, связанные с поворотом фрагментов друг относительно друга [6-7]. В целом же непрерывная неоднородность мало влияет на прочность и трещиностойкость породного массива [1].

Скачкообразная неоднородность, характеризующая резким изменением упругости и трещиностойкости между слоями, неодинаково влияет на распространение трещин отрыва и сдвига [1]. При приближении к границе раздела слоёв с различными свойствами, когда трещина находится в более жестком слое, её более выгодно распространяться в сторону границы раздела при отрыве, и в противоположную сторону – при сдвиге. Если же трещина находится в менее жестком слое, наблюдается обратная картина. Другими словами, для трещины, находящейся в более жестком слое, отрыв идет параллельно границе раздела, а сдвиг – перпендикулярно ей.

Экспериментально установлено, что если более жесткий слой породы имеет меньшую трещиностойкость, то, при переходе трещины в более трещиностойкий слой, граница раздела является стопором, трещина распространяется по границе раздела или вдоль неё, и трещиностойкость многослойного массива близка к слою с максимальной трещиностойкостью. При переходе трещины в менее трещиностойкий слой, она сечет его по нормали, а трещиностойкость многослойного массива близка к наименьшей величине. То есть, энергоёмкость разрушения многослойного массива близка к тому слою, в который стремится трещина.

Если же более жесткий слой является одновременно и более трещиностойким, то энергоёмкость разрушения многослойного массива всегда близка к слою с большей трещиностойкостью, а трещина распространяется перпендикулярно границе раздела.

Коэффициент упрочнения (ослабления) за счет влияния границы раздела может быть представлен в виде:

$$k_{o(e)} = \sqrt{(\gamma_1 / \gamma_2)(\gamma_2 / \gamma_3) \dots (\gamma_{n-1} / \gamma_n)},$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ – трещиностойкости смежных слоёв, в которые стремится трещина.

Если более жесткий слой (блок) породы является одновременно и более трещиностойким, располагается ближе к поверхности обнажения, то трещины в нём распространяются параллельно плоскости обнажения, а прочность слоистой среды в объёмном поле сжимающих напряжений находится в промежутке между прочностями составляющих слоёв. Разрушение более жесткого и трещиностойкого слоя вызывает автоматически и разрушение менее трещиностойкого соседнего слоя.

Если ближе к поверхности обнажения находится менее трещиностойкий слой, то трещины распространяются под углом к поверхности обнажения.

Когда большую трещиностойкость имеет менее жесткий слой, который не является концентратором напряжений, возможны два противоположных эффекта. Если он расположен ближе к поверхности обнажения, то зародившиеся в менее трещиностойком слое сдвиговые трещины распространяются под углом к границе раздела, но, поскольку граница является стопором, слой не разрушается до тех пор, пока не разрушится более трещиностойкий слой. В этом случае прочность многослойного массива может быть даже больше наиболее прочного слоя (эффект композиционных материалов). Если же более трещиностойкий, но менее жесткий слой, удален от поверхности обнажения вглубь массива, разрушение идет по слабому слою, прилегающему к поверхности обнажения, трещины распространяются параллельно поверхности обнажения, но, поскольку граница раздела является стопором, более трещиностойкий слой может оказаться вовсе не разрушенным.

Таким образом, разрушение слоистого массива не всегда идет по «слабому» звену. Все зависит от соотношения свойств слоёв. При этом реальные свойства пород могут существенно отличаться от теоретических моделей. Если теория предполагает, что слой с большей упругостью является одновременно и более трещиностойким, то в реальности трещиностойкости угля сланца и песчаника могут быть одинаковыми, несмотря на значительное отличие их упругих свойств. В результате при сдвиге пород вокруг очистных и подготовительных выработок, трещины, распространяющиеся в подрабатываемой толще, могут быть как прямолинейными (криволинейными), так и ступенчатыми. Однако, с точки зрения обводнения выработок, большее значение имеет раскрытие (зияние) этих трещин.

2. Характер и механизм распространения трещин в горных породах

При малом всестороннем (боковом) давлении сопротивление сдвигу по границам раздела на порядок меньше, чем внутри структурного блока (по границам зерен меньше, чем по зерну; по границе раздела слоёв меньше, чем по слою; по границе структурных блоков меньше, чем внутри блока). При сдвиге, в этом случае, может происходить смещение структурных элементов перпендикулярно поверхностям трещины.

При высоких боковых давлениях и невозможности смещения перпендикулярно поверхностям трещины, прочность на сдвиг по границе раздела приближается к прочности структурного элемента, а когда они сравниваются по величине, скол по структурному элементу становится более вероятным, чем по границе раздела [1].

Учитывая, что субширотная горизонтальная составляющая поля напряжений в горном массиве является максимальной, а вертикальная – промежуточной или минимальной, характер разрушения слоёв во многом будет определяться направлением выемки, способом управления кровлей и др. При этом немаловажную роль имеет направление и ко-

личество зародышевых трещин в породах, и минеральный состав пород.

Так, в [1] показано, что зародышевые трещины в песчанике образуются у зерен кварца за счет различия пластических свойств цемента и кварца, за счет проскальзывания зерен относительно друг друга, а также внутри зерен за счет слияния пор, раздавливания или раскалывания. В известняках, карбонатном цементе песчаников, в зернах полевых шпатов зарождение трещин происходит путем раскрытия двойниковых плоскостей и плоскостей спайности.

Распространение трещин также происходит по-разному. В карбонатах, глинистых сланцах, песчаниках с базальным цементом трещины развиваются за счет слияния пор и микротрещин, которые образуются в плоскости локализации деформации на границах зерен и плоскостях спайности. Когда количество микротрещин в единице объёма (плотность дефектов) достигает критического значения, они сливаются в микротрещину. В песчаниках с поровым и контактово-поровым цементом распространение трещин происходит путем постепенного прорастания зародышевых трещин.

Шероховатость берегов трещин сдвига составляет сотые доли миллиметра и, при шероховатости более 40 мкм, коэффициент трения берегов друг о друга от шероховатости практически не зависит. В карбонатах и песчаниках коэффициент трения составляет 0,5-0,6, в сланцах и песчаниках с глинистым цементом – 0,3-0,4.

При больших боковых давлениях происходит смена зернограницного распространения трещин на транскристаллитное, шероховатость берегов трещин и их раскрытие уменьшается, а коэффициент трения берегов друг о друга начинает зависеть от шероховатости из-за возникновения молекулярных связей.

На фотографиях представлены трещины в аншлифах и прозрачных шлифах, свидетельствующие о различных механизмах разрушения и различном раскрытии трещин в породах с увеличением глубины и величины бокового давления.

После раскрытия трещины её берега удалены на расстояние [7]

$$\delta = \frac{\gamma}{\tau_e},$$

где γ – удельная поверхностная энергия разрушения, Дж/м²;

τ_e – предел текучести породы, МПа.

До тех пор, пока разрушение идет по границам зерен, раскрытие трещины может достигать нескольких миллиметров. После смены зернограницного разрушения транскристаллитным, раскрытие трещин уменьшается до десятых и даже тысячных долей миллиметра.

Глубина, на которой происходит смена механизма разрушения, может быть определена по формуле:

$$H = \frac{\tau_e}{0,8\rho tg\delta},$$

где ρ – объёмный вес, кН/м³;

$tg\delta$ – коэффициент внутреннего трения.

Расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в угле смена механизма разрушения происходит на глубинах 150-160 м, в глинистых сланцах – 400 м, песчаных сланцах – 500-600 м, песчаниках – 900-950 м.

Когда трещина распространяется в слоистой среде, раскрытие её может меняться в зависимости от напряженного состояния и трещиностойкости слоёв.

Ещё в нетронutom массиве сжатие перпендикулярно слоистости вызывает растяжение и разрыв на блоки жестких слоёв (будинаж), течение слабых пластичных слоёв. Сжатие параллельно слоям вызывает раздувы и пережимы. Из-за различия напряженного состояния отдельных блоков и слоёв ориентация трещин относительно разрушающего максимального напряжения также может отличаться. Однако общая закономерность уменьшения раскрытия трещин с увеличением глубины сохраняется и для нетронutom массива.

В блоках, где вертикальная компонента горного давления превалирует над горизонтальной, при выемке полезного ископаемого в первую очередь проявляется раскрытие вертикальных трещин, а расслоение слоёв проявляется уже вследствие их прогиба и обрушения. В таких случаях отработка выемочных участков характеризуется повышенными притоками воды из подработанных толщ.

В случае, когда субширотная составляющая горного давления превалирует над вертикальной, раскрытие трещин параллельно напластованию увеличивается, а перпендикулярно напластованию – уменьшается. Выемка полезного ископаемого с полным обрушением по простиранию в таких условиях приводит к интенсификации расслоения слоёв, раскрытию трещин перпендикулярно напластованию и обрушению, что облегчает поддержание подготовительных выработок, но увеличивает водо- и газопритоки из подработанной и надработанной толщ. Выемка полезного ископаемого по восстанию приводит к задержке обрушения слоёв кровли из-за распора в субширотном направлении, ухудшению состояния подготовительных выработок и уменьшению водопритоков.

Резюме.

Рассмотрение характера разрушения неоднородного массива на макроуровне свидетельствует о том, что механизм разрушения и раскрытие трещин существенно зависят от напряженного состояния массива, его строения и глубины ведения работ. Это, в свою очередь, существенно влияет на величину водопритоков в горные выработки при отработке месторождений. Однако, вопросы образования микро- и макротрещин в горных породах, как критических структурных переходов, требуют специального исследования.

Литература.

1. Разрушение горных пород в объёмном поле сжимающих напряжений / Алексеев А.Д., Рева В.Н., Рязанцев Н.А. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.
2. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Фан, 1979. – 168 с.
3. Плечев В.Н. процесс разрушения как фазовое превращение // Проблемы прочности. – 1974, №6, Т. 1,2.
4. Белл Дж. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. – М.: Наука, 1982. – 140 с.
5. Мохначев М.И., Присташ В.В. Динамическая прочность горных пород. – М.: наука, 1982. – 140 с.
6. Рязанцев Н.А., Носач А.К. Пластические деформации в горных породах // Уголь Украины, 1990, №12. – С. 36 – 40.
7. Шемякин Е.И. К изучению механизма разрушения прочных горных пород ударными нагрузками / Вопросы механизма разрушения горных пород. – Новосибирск, 1976. – С. 3 – 14.