

Література

1. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: Недра, 2001. – 413 с.
2. Зорин А.Н. Управление динамическими проявлениями горного давления. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
3. Писаренко Г.С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – К.: Изд. АН УССР, 1962. – 436 с.
4. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
5. Барановський Е.М. Енергетична оцінка стану гірського масиву при бурінні глибоких свердловин // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2005. – Випуск 1(14). – С. 34-39.
6. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела: В 2-х т. – М.: Наука, 1975. – Т.1. – 832 с.
7. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. – М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. – 260 с.
8. Бахвалов А.И., Кузнецов Ю.И., Пономарёв В.Н. и др. Магнитометрические исследования Кольской сверхглубокой скважины // Советская геология. – 1989. – № 9. – С.83-87.
9. Горбачевич Ф.Ф., Козловская О.В., Розаев А.Е., Шамрай Г.И. Инженерно-геологическая характеристика пород разреза Уральской сверхглубокой скважины // Изв. РАН. Сер.: Геоэкология. – 1993. – №5. – С.66-74.

УДК 622.24.051

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД З ВРАХУВАННЯМ НЕОДНОРІДНОСТІ ЇХ СТРУКТУРИ

Т.О.Пригорювська

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 45369,
e-mail: spring@nung.if.ua

Проанализирован процесс разрушения горных пород с учётом их структурной неоднородности. Показано, что данный процесс является вероятностным, рассчитана вероятность прочности породы в заданной точке с учётом функции распределения неоднородностей.

The process of rock destruction with their heterogeneity was analyzed. It was determined, that this process is probabilistic, the rock hardness probability of given point was calculated.

Знання механізму руйнування гірських порід, розвитку в них мікро- та макродеформацій під дією механічних навантажень лежить в основі проектування найбільш прогресивних конструкцій породоруйнівних інструментів, які застосовуються в бурінні [3]. Буровий інструмент проектується з врахуванням взаємозв'язків між конструктивними елементами, міцнісними характеристиками матеріалу і т.д., але, оскільки основне призначення бурового інструменту — руйнування породи, то доцільно використати інший шлях — від властивостей породи до умов руйнування, що створюються інструментом.

У світовій практиці буріння такий підхід є досить поширеним, оскільки проектування моделі гірського масиву для конкретної свердловини є початковим етапом моделювання процесу буріння. Модель масиву використовується для вибору траєкторії свердловини. Такий комплексний підхід, за даними науковців фірми Schlumberger, дав змогу їм суттєво знизити витрати, пов'язані з будівництвом свердловин

з меж пластів, розломів, констант пружності, напрямків напружень і їх змін зі зміною глибини, міцності порід і розподілу пластового тиску.

Згідно з означенням [1], під термінами “гірська порода” та “корисні копалини” на сучасному етапі розвитку геологічних наук розуміють природний агрегат відповідного мінерального складу, будови, текстурних та структурних особливостей, який утворився в надрах Землі або на її поверхні в результаті різноманітних геологічних процесів і займає певний простір. Гірські породи являють собою неоднорідне, багатоконпонентне середовище, що складається з структурних елементів — зерен, які різняться між собою фізичними та механічними властивостями, та з пор, мікротріщин та субмікротріщин, насичених рідиною або газом. Опис фізичних явищ при пластичному деформуванні гірських порід з використанням моделі однорідного суцільного середовища викликає значні труднощі [4]. Про однорідність властивостей гірської породи можна говорити лише в границ-

ному малому її об'ємі, так щоб $\lim \Delta V \rightarrow 0$. Тому доцільно при побудові моделей руйнування гірських порід враховувати неоднорідність їх структури. Структура гірських порід порівняно з іншими матеріалами (наприклад, металами) володіє значно більшою неоднорідністю. Тому процес пластичного деформування гірських порід протікає досить складно, оскільки він пов'язаний з мікро- та макронеоднорідністю їх будови та різного роду дефектами кристалічної ґратки [2]. Ця обставина впливає на процес деформування гірських порід. Під терміном “геологічна неоднорідність” розуміється зміна значень геолого-фізичних ознак на множині всіх елементарних неумовних та умовних геологічних тіл, що виділяється в досліджуваному зразку геологічного простору за тими базисними ознаками і на тому ієрархічному рівні, який відповідає меті дослідження [3].

Ідея про розподіл мікродефектів була використана в багатьох статистичних теоріях міцності і, зокрема, в теорії крихкої міцності Я.І.Френзеля та Т.А.Конторової, а також теорії масштабного фактора гірських порід М.М.Протодьяконова. Статистична теорія, що була розвинута В.Т.Бреді (1970 рік), розглядає поведінку матеріалів, що мають тріщини з різною орієнтацією стосовно осей головних напружень.

При моделюванні гірських порід вони розглядаються у вигляді сукупності структурних елементів (зерен), кожен з яких володіє однорідними реологічними властивостями. Простір між структурними елементами заповнено ізотропним однорідним матеріалом. Проте для спрощення побудови моделі породи віднесемо їх до категорії суцільних середовищ, властивості яких є досить специфічними — їх характеризує складний мінералогічний склад зерен, зв'язаних між собою, пористість і ряд інших фізико-механічних властивостей [1]. При побудові моделі руйнування гірської породи вважатимемо, що властивості гірської породи є однаковими у всіх напрямках, тобто середовище є ізотропним та неоднорідним. Під ізотропно неоднорідністю мається на увазі ізотропне тіло, у якого при переході від точки до точки змінюються модулі пружності, коефіцієнт Пуассона, але, якщо в довільній точці властивості є однаковими у всіх напрямках.

Згідно з сучасними уявленнями теорії руйнування [6] в реальних умовах розвиток початкових тріщин, що вже присутні в матеріалі (в тому числі, і в породі), залежить від таких параметрів, як матеріал, форма і розміри тіла, спосіб прикладання зовнішнього навантаження, час, число циклів навантаження, температура, ступінь агресивності зовнішнього середовища, швидкість і передісторія деформування і т.д. На думку деяких науковців [4], тріщина буде виникати (поширюватися) в тих точках, де комбінація певних параметрів (напружень, деформацій і т.д.) досягатиме критичних значень під дією прикладеної сили різання. При цьому кінетику процесу руйнування, що пов'язана з розвитком дислокацій, схематично можна представити як послідовний перехід від скупчення і

злиття дислокацій, що призводить до локальної концентрації напружень і утворення зародкових тріщин, до їх розвитку і об'єднання, до утворення головної тріщини руйнування [13].

При цьому експериментальні дослідження свідчать, що гірські породи поділяються на номінеральні (наприклад, мармур) та полімінеральні (наприклад, піщаники). Також в результаті досліджень у різних породах був виявлений різний характер розподілу зерен та їх розмірів.

Гірські породи і масиви внаслідок неоднорідності складу та структури мають складну будову простору дефектів, дислокацій та інших місць “послаблень”, які являють собою тривимірну систему умовно взаємопов'язаних дефектів різної форми та розмірів. Опис структури простору дефектів є досить складним завданням, виділення елементів структури на кожному структурному рівні передбачає наявність меж між ними, і неоднорідність в такому випадку буде виражатися в стрибкоподібній зміні базисної ознаки від елемента до елемента. Наявність таких меж означає дискретність геологічного простору. Виходячи з автономності елементів, як характеристику структури можна використати закон розподілу ймовірностей значень базисних ознак, що є співставлені з елементами. Використовуючи закон розподілу як характеристику структури, можна використати параметри розподілу як показники неоднорідності і використати для опису моделі породи математичні методи (методи опису одномірного, двомірного або багатомірного трендів) [3].

В роботах [5, 6] як найбільш істотні фактори, що визначають неоднорідність гірської породи, вибрані пористість порід та їх тріщинуватість, які виникли в процесі утворення породи та під впливом існуючих в масиві напружень. Дані фактори найбільш суттєво впливають на міцнісні та деформаційні властивості порід — міцність елементарного об'єму породи буде значно вищою, ніж міцність масиву порід [6].

Ці параметри далеко не повністю описують модель гірської породи, проте дану модель можна доповнити іншими параметрами, які мають значущість для дослідника. Напруження, які діють на дефектні ділянки, викликають в них зростання тріщин, що призводить до повного або локального руйнування матеріалу. Розміщення таких дефектів має стохастичний характер, а кожний довільно вибраний елементарний об'єм породи характеризується локальною міцністю, яка визначається міцністю його найслабшого місця і є випадковою величиною. Тому доцільно проаналізувати функцію розподілу різного роду дефектів в породі, яку розглянемо як імовірнісну величину. Руйнування гірської породи, поширення тріщини, виходячи з вищенаведеного, є теж процесом імовірнісним. При цьому, якщо в деякій точці $\sigma < \sigma_n$, (де σ_n – граничне напруження), то руйнування в цій точці неможливе, тобто, в загальному випадку тріщина під дією навантаження буде проходити саме по місцях дислокацій. Функція,

яка описує розподіл дефектів в породі, може бути використана для опису пустот, що виникають в породі.

Проаналізуємо дійсну величину напружень, що дорівнює відношенню зусилля навантаження до одиничної ділянки об'єму породи, а також визначимо, як впливає неоднорідність структури на величину контактної міцності породи.

Зазвичай при побудові математичної моделі руйнування породи одиничним різцем алмазного долота доцільно перейти до циліндричної системи координат ρ, θ, Z , де: ρ – радіус-вектор, перпендикулярний до осі Z , початок якої приймається на осі долота в початковий момент часу до проникнення зубців долота в поверхню вибою; θ – кутова координата, відраховується проти годинникової стрілки в площині креслення, тобто проти напрямку осі Z ; вісь Z вказує напрям руху долота. Це викликано тим, що проекція вибою на горизонтальну площину є наближеною до кола. Для розрахунку формуємо сітку на вибої, вузли сітки задаються координатами ρ та θ , у кожному вузлі сітки координату Z_{ij} приймаємо сталою величиною. При цьому приймаємо, що крок по осях X та Y (які перетворюються в полярні координати за формулами $X = \rho \cdot \cos \theta$, $Y = \rho \cdot \sin \theta$) є величиною умовно сталою для кожної породи і є рівним середній величині частинки, що утворюється при подрібненні даної породи. Таке припущення викликано тим, що, чим більш дисперсною є порода, тим вона є менш міцною.

Для спрощення побудови моделі використовуємо припущення, що неоднорідності розміщені у формі спіралі, формула якої у полярній системі координат має вигляд: $\rho = a \cdot e^{k \cdot \theta}$, де a та k – деякі коефіцієнти, які приймаємо сталими для певної породи. На практиці для розрахунків доцільно коефіцієнт k прийняти рівним коефіцієнту пористості породи, коефіцієнт a – середньому значенню величини частинки, що утворюється при подрібненні даної породи. Власне, умовно можна прийняти і інший закон розподілу.

Міцність елементарного об'єму породи залежить від співвідношення менш міцних ділянок цього об'єму, межа міцності яких становить σ до загального числа ділянок в даному об'ємі. Тоді дійсне напруження на аналізованій ділянці становить

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + P(\sigma)}$$

Згідно з [6] функція густини ймовірності інтенсивності напружень становить

$$P(\sigma_i) = 2\lambda[\sigma] \sqrt{\frac{1+\mu}{6E}} \cdot e^{\left(-\lambda\sigma_i \cdot \frac{1+\mu}{6E}\right)}, \quad (1)$$

де: σ_i – інтенсивність напружень в точці; μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга породи; λ – величина, обернена середній питомій енергії деформації в деформованій області масиву. Дана формула дає змогу визначити ймовірнісне значення величини напружень в довільній точці

$A(x_i, y_i)$, проте не враховує масштабного фактора і не дає змоги оцінити міцність в іншій точці масиву, наприклад, в точці $A(x_{i+1}, y_{i+1})$. Тому доцільно ввести масштабний фактор і прийняти, що дислокації розміщені в одиничному зразку породи за певним законом. Тобто, наведена вище формула набуває вигляду

$$P(\sigma_i) \cdot M(\rho, \theta) = 2\lambda[\sigma] \sqrt{\frac{1+\mu}{6E}} \cdot e^{\left(-\lambda\sigma_i \cdot \frac{1+\mu}{6E}\right)}, \quad (3)$$

де $M(\rho, \theta)$ – коефіцієнт (характеристика) розподілу дислокацій, який вказує, чи є неоднорідність в точці з певною координатою. При цьому коефіцієнт $M(\rho, \theta)$ може приймати такі значення:

$$M(\rho, \theta) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \rho = k \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases},$$

де k – коефіцієнт пористості породи.

Методики, описані в [5, 6], містять чимало емпіричних коефіцієнтів, що вимагають додаткових досліджень властивостей порід. Всі величини, що входять у формулу (2), є визначеними попередньо для кожної породи окремо, що не потребує спеціальних досліджень та експериментів.

Аналізуючи наведену формулу, бачимо, що неперервна неоднорідність суттєво зменшує міцність породи і тим суттєвіше, чим суттєвіше виражена неоднорідність.

Проаналізуємо, як впливає неоднорідність макроструктури на процес руйнування породи. Розглянемо неоднорідну площину, яка є в стиснутому стані (в реальних умовах на масив гірських порід діють сили ваги, сили порового, гідростатичного тиску і т.д.). В початковий момент часу середовище деформується в межах закону Гука, тобто пластичні деформації відсутні. При зростанні інтенсивності дотичних напружень в пластичних елементах з'являються пластичні деформації, розвиток яких призводить до накопичення мікронапружень, що екранують зовнішні зусилля і таких, що запобігають подальшому розвитку пластичної деформації. При подальшому зростанні мікронапруження в пластичних елементах настільки зростає, що це призводить до руйнування зв'язків між зернами, тобто утворення тріщин. Істотну роль при виникненні та розвитку мікротріщин відіграють саме різні дислокації, оскільки мікротріщина може розвинути на межі включення або саме з нього. Дані тріщини є нерегулярними, нерівномірними, усіляких розмірів, тобто їхні конфігурації є фрактальними кривими з дробовими розмірностями (D), при цьому величина $1 < D < 2$ тим є більшою, чим більш порізанним є берег тріщини. Проте, застосовуючи для моделювання тріщини фрактальної кривої, необхідно пам'ятати, що така поверхня з математичної точки зору є безмежною, а фрактальна крива є нескінченно звивистою, а ці характеристики є скінченими для тріщини. Тому фрактальна модель тріщини застосовується для масштабів r , $l_0 \ll r \ll L_0$, де l_0 – характеристика

мікроструктури середовища, L_0 – геометричний розмір середовища.

Нехай тріщина є стохастичним фракталом певної розмірності D (приймемо, що D умовно дорівнює величині зерна мікроструктури) і поширюється вздовж осі OX , відповідно напруження σ перпендикулярні до осі OY . Поточний розмір тріщини уздовж осі OX становить R_1 , а середній розмір вздовж осі OY — $R_2 \ll R_1$. Вважаємо поверхні тріщини гладкими, а її фронт – фрактальною кривою. З точки зору фізики критерієм руйнування твердого тіла (до якого відносимо і породи) може бути лише енергетична характеристика. За критерієм Гріффітса, зі збільшенням розміру тріщини на ΔR пружна енергія, що вивільнюється, дорівнює збільшенню поверхневої енергії розрізу, тобто:

$$R^{2-D} \cong \frac{2\gamma DE}{\sigma^2}, \text{ де } E - \text{модуль пружності мате-}$$

ріалу, γ – питома поверхнева енергія, приймаємо $\gamma=1$ [14].

При зростанні напружень стає можливим затягування в процес деформації нових більш міцних елементів, проте всі тріщини будуть розвиватися в одному напрямку. Крихке руйнування (виникнення, розкриття і ріст тріщини) виникає переважно в міжзеренних прошарках і зумовлюється нормальними розтягуючими напруженнями. Накопичення мікроруйнувань має спрямований характер і концентрується на площинах, що є перпендикулярними до напрямку розтягуючого зусилля. Руйнування можливе і на площинах, що є паралельними напрямку розтягу (наприклад, при бурінні шаруватих порід).

Якщо мова йде про розрахунок параметрів руйнування породи долотами з АТП, то для кожного різця, що розміщений на своєму радіусі, враховуючи порівняно невеликі розміри мікродефектів, ми повинні виконати значну кількість однотипних обчислень для того, щоб можна було вже наступним кроком визначити величини проходки, об'єму зруйнованої породи для кожного різця та інструменту загалом. При цьому ми обчислюємо значення шуканих параметрів в дискретних точках сітки, але, оскільки $\lim \Delta r, \Delta \theta \rightarrow 0$, то, склавши інтегральну суму значень для всіх точок поверхні, спершу треба знайти сумарне значення переміщення частинок вибуреної породи, а тоді вже визначити значення проходки та об'єм зруйнованої породи для всього інструменту.

Проблема громіздкості однотипних розрахунків розв'язується з використанням таких ЕОМ, при цьому розрахунки не потребують потужних математичних програм на зразок MathCad, Mathematica, Maple.

Література

1. Геология, разведка, бурение и добыча нефти. Серия: Для профессионалов и неспециалистов / Хайн Норман Дж. – М.: Олимп-бизнес, 2003.
2. Дементьев Л.Д. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии: Учеб. пособие для вузов. – М.: Недра, 1983. – 189 с.
3. Алексеев А.Д. Разрушение горных пород в поле напряжений. – М.: Недра, 1989.
4. Ставрогин А.Н., Протосеня М.К. Механика деформирования и разрушения горных пород. – М.: Недра, 1992.
5. Страшко В.А., Шматовский Л.Д., Вдовиченко В.П. Зависимость сопротивляемости горных пород разрушению от степени их напряженности и нарушений сплошности. Сер.: Строительство скважин. – М.: ВНИИОЭНГ, 1989. – 69 с.
6. Мишлаевский Л. Л. Совершенствование конструкции режущих буровых долот на основе моделирования процесса бурения: Автореф. Дис... к.т.н.: 05.15.11/ АН СССР. Институт горного дела Севера. – Якутск, 1990. – 17 с.
7. Новиков В.Ф., Шлык Ю.К. Определение внутренних деформаций горных пород: Материалы Всесоюзной конференции «Механика горных пород при бурении». – Грозный, 1986. – С.21.
8. Behr S.H., Warren T.M., Sinor L.A., Brett J.F. Three-dimensional Modeling of PDC-bits/SPE/IADC 21928, 1991
9. Павлова Н.Н., Шрейнер А.А. Разрушение горных пород при динамических нагрузках. – М.: Недра, 1977.
10. www.schulmerger.com/science від 25.11.2003р.
11. Васютин А.Н. О критерии прочности материала при наличии коротких трещин // Физико-химическая механика материалов. – 1988. – Т. 24. – № 3. – С. 68-74.
12. www.roxar.ru/solutions/irap/RMSPetrophysical від 25.11.2001р.
13. Павлова Н.Н. Трещиноватость и разрушение горных пород. – М.: Наука, 1970. – 96 с.
14. Усов В.Н., Шкатулок Н.М. Фрактальной природы крихких зламыв металлу // Физико-химическая механика материалов. – 2005. – №1. – Т. 24. – С.58-61