

3. Чемерис И.Ф., Головки Ю.Н. Слободяникова И.Л. Исследование математической модели процесса горения угольной частицы при переменных параметрах пульсирующего потока газозвеси // Геотехническая механика. Межд. сб. науч. тр. – 2001. - Вып. 29. - С. 176 – 182.

4. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. М., 1957. – С. 442.

5. Муц В.А., Баскаков А.П., Ашихмин А.А. Расчет газообразования при горении твердого топлива в кипящем слое // ИФЖ. – 1988. - Т.54, № 3. – С. 432 – 438.

6. Волкова А.А., Шихов В.Н., Баскаков А.П. Моделирование и организация процессов сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое // Проблемы тепло- и массопереноса в процессах горения, используемых в энергетике. - Минск, 1980. - С. 79 – 94.

7. Бабий В.И., Серебрякова А.Г. Массообмен между частицами угольной пыли и газовой средой при горении. // Теплоэнергетика. - 1971. - № 2. - С. 40 – 44.

8. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. - М.: Энергия, 1977. – 248 с.

УДК 622.023.23:539.415

Г.І. Ларіонов, С.М. Павлишин,
С.М. Пилипчук

ПРО ВНУТРІШНЄ ТЕРТЯ В КРИТЕРІЇ КУЛОНА-МОРА

В последнее время в статьях многих авторов, использующих критерий Кулона-Мора, отсутствует единое понимание физического содержания параметров критерия, и в частности коэффициента внутреннего трения. В работе детально анализируется физический смысл параметров критерия Кулона-Мора и трансформация их понимания до настоящего времени. Установлена необходимость замены термина “коэффициент внутреннего трения” на “коэффициент пропорциональности”. Показано принципиальное отличие между внутренним и внешним трением.

ON INTERNAL FRICTION IN COULOMB-MOHR'S CRITERION

The Coulomb-Mohr's criterion is used in rock mechanics investigations often. But not exist one understanding and apparent point of view to parameter contents, namely, internal friction coefficient. Therefore, Coulomb-Mohr criterion parameters were analyzed and traced its sense variations from early to the time being. Necessity to change the term internal friction coefficient to proportion one was proposed. The criteria and principal external and internal friction differences are presented.

Одним з найпопулярніших критеріїв міцності в механіці гірських порід є закон Кулона-Мора, про що красномовно свідчить величезна кількість статей присвячених його використанню. Одним з важливих параметрів цього критерію є коефіцієнт внутрішнього тертя. Цей критерій було сформульовано в 17 ст. і він в повній мірі відповідав уявленню тих часів про фізичні процеси, що протікають під час тертя твердих тіл, про модель середовища, з якого склалися ці тверді тіла тощо.

З плином часу і значним прогресом у вивченні питань тертя твердих тіл в моделях середовища в механіці твердого тіла та гірських порід змінився фізичний зміст вживаних термінів і зокрема внутрішнього тертя та кута внутрішнього тертя в законі Кулона-Мора. Для того щоб з'ясувати, яким чином змінювався фізичний зміст цих термінів, необхідно простежити весь шлях їх вживання від появи до теперішніх часів.

Критерій міцності є стислим вираженням змісту використовуваної теорії міцності [1]. В запропонованій Кулоном теорії максимальних дотичних напружень стверджується, що матеріал починає руйнуватися, коли максимальне дотичне напруження в певній його точці у досягає величини міцності його на зсув: $\tau_{max} = c\theta$.

Результати випробовувань матеріалів різної природи у випадку одночасної дії напружень по трьох осях виявили невідповідність між кутом нахилу площини руйнування та кутом, що визначається згідно з критерієм Кулона [2]. У зв'язку з цією обставиною Нав'є модифікував теорію Кулона, припустивши, що дія нормального напруження збільшує опір матеріалу на зсув в площині руйнування на пропорційну йому величину. Згідно з теорією Кулона-Нав'є руйнування почнеться в тому випадку, коли дотичне напруження, що діє в площині руйнування досягне величини

$$|\tau_{\alpha}| = \mu\sigma_{\alpha} + c_0, \quad (1)$$

де c_0 – міцність матеріалу на зсув, τ_{α} , σ_{α} – дотичне та нормальне напруження на поверхні руйнування.

Оскільки вираз для дотичних напружень τ_{α} аналогічний до дії сил тертя на похилій площині, під дією нормальної складової $\tau_{\alpha} = \mu\sigma_{\alpha}$, то коефіцієнт μ назвали коефіцієнтом внутрішнього тертя і визначили його за формулою $\mu = \operatorname{tg}\varphi$, де φ – кут внутрішнього тертя (кут нахилу похилої площини, на якій виникає тертя під дією нормальної складової).

Найбільшого поширення критерій Кулона-Нав'є, більш відомий у нас як критерій Кулона, одержав в механіці сипучих середовищ [3]. Фактично він являє собою умову втрати рівноваги масиву сипучого середовища. В цьому випадку величина τ являє собою зусилля зсуву на поверхні, що розглядається, μ є коефіцієнтом тертя, що виникає між частинками сипучого середовища, σ_{α} – це напруження нормальне до поверхні, а c_0 – величина зчеплення між частинками середовища. Параметри рівності (1) таким чином набувають прозорого фізичного змісту, а коефіцієнт внутрішнього тертя μ і величина сили зчеплення між частинками сипучого середовища дійсно являють собою внутрішні характеристики середовища [3]. У випадку, коли зчеплення між частинками середовища відсутні: $c_0 = 0$, то середовище є ідеально сипучим, а у випадку відсутності тертя між частинками: $\mu = 0$, середовище називають ідеально в'язким. Простота критерію Кулона, прозорий фізичний зміст його складових дозволили використовувати його до середовищ з різними властивостями: від ідеально сипучого до ідеально в'язкого, що власне і визначило його широке використання в механіці сипучих та ґрунтів [3, 4].

З математичної точки зору рівність (1) є рівнянням прямої в координатах τ – σ , яка на осі ординат відтинає відрізок OC , величина якого дорівнює величині зчеплення.

Для побудови прямої достатньо мати дві точки (рис. 1). Точка C може бути отримана з експерименту на чистий зсув при $\sigma_{\alpha} = 0$. Додаткова точка отримується шляхом випробовування зразків гірської породи на зсув при наявності навантаження $\sigma_{\alpha} \neq 0$ (точка D на рис. 1). Кут внутрішнього тертя визначається як кут між цією прямою і додатнім напрямом осі абсцис.

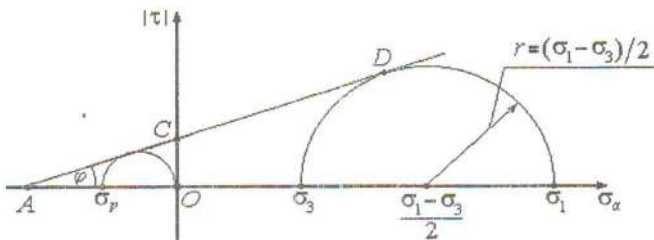


Рис. 1 - Визначення кута внутрішнього тертя

Графічне зображення рівняння (1) являє собою паспорт міцності гірських порід. Знаючи геометрію кіл напружень та загальної дотичної до цих кіл можна отримати границі міцності матеріалу на одноосьове стискування.

Після багатьох проведених дослідів було встановлено [4], що для сипучих матеріалів опір на зсув являє собою тільки опір тертя, а для зв'язаних ґрунтів він складається як з опору тертя, так і зі зчеплення між частинками матеріалу. Причому методи окремої оцінки величини зчеплення і тертя відсутні. Проблема полягає в тому, що будь-які зміни нормального навантаження практично впливають на зміну обох складових внаслідок відновлення зчеплення під дією нормального навантаження та фізичної спільності тертя та зсуву.

При застосуванні критерію Кулона до зв'язаних гірських порід було встановлено справедливість його використання для вулканічних порід. Коефіцієнт тертя μ не є сталим для багатьох мегаморфічних та осадочних порід, і особливо для деяких видів карбонатів, більшості глинистих сланців та пластичних матеріалів [2]. Низька вірогідність використання критерію Кулона при визначенні граничного напруженого стану для цих класів порід змусила Мора припустити, що матеріал буде руйнуватися (або необмежено деформуватися), коли дотичні напруження в площині руйнування досягнуть величини залежної від нормального напруження на цій площині, або коли найбільше головне розтягуюче напруження досягне граничної величини σ_p . Тобто $\tau = f(\sigma)$. У випадку, коли коефіцієнт внутрішнього тертя є сталим, критерії Кулона і Мора є тотожними. Оскільки подібне спрощення або припущення використовуються досить часто, то критерій в таких випадках називають критерієм Кулона-Мора.

Через деякий час після появи теорії Мора дослідники Карман і Беккер провели серію дослідів [2], побудували огинаючу криву і в цілому підтвердили працездатність цієї теорії, але одночасно висловили сумнів стосовно розгляду параметра ϕ в якості кута внутрішнього тертя. Так з побудованих дотичних кривих випливало, що при великих значеннях стискаючих напружень величина дотичного напруження не збільшується, а наближається до сталої величини, а відповідно кут внутрішнього тертя на цій ділянці кривої наближався до нуля. Фізичного обґрунтування цього явища не давалось. Більше того, з'ясувалося [5], що процес формування умов руйнування при зсуві досить складний і недостатньо вивчений. Проводячи досліди на зсув з навантаженням іноді

отримували взаємопротилежні результати. Коefіцієнт варіації експериментально визначених величин зусиль на зсув коливався в межах від 10 до 50 %. При такій розбіжності значень величин τ і σ_a степiнь вірогідності огинаючої кривої зсуву невисока.

Недостатня з'ясованість природи і фізичного змісту кута внутрішнього тертя призвела до того, що дослідники почали пов'язувати з кутами різної природи. Так в деяких в деяких роботах цей кут вважають рівним куту природного схилу високого відвалу дробленої гірської породи. Ряд дослідників визначають величину кута внутрішнього тертя як кут початку руху зразків гірських порід по похилій площині, при цьому робочим поверхням тертя штучно надавалась шорохуватість (фактура), що була на поверхнях зсуву зразків, зруйнованих дією дотичних напружень [6]. Розуміючи складність процесів тертя гірських порід деякі дослідники пов'язували величину кута внутрішнього тертя з коefіцієнтом міцності гірських порід за Протод'яконовим М.М. [6].

Що ж насправді слід розуміти під поняттям “кута внутрішнього тертя”, якщо його величина може визначатися зовсім різними за своєю природою величинами? Оскільки термін внутрішнього тертя пов'язувався і раніше з тертям твердих тіл слід розглянути більш уважно механізм виникнення тертя при дотику двох твердих тіл [7]. Під дією стискаючого навантаження дві поверхні контактують поступово у все більшій кількості точок. Спочатку взаємодіючі елементи поверхонь деформуються пружно, потім, по мірі зростання навантаження, пружна деформація змінюється на пластичну. Такий механізм тертя має місце і для металів і для гірських порід [8]. Взаємодія контактуючих поверхонь проявляється у формуванні зон дотику, які включають не тільки виступи, але й прилеглий до них виступів матеріал.

Тертя має подвійну молекулярно-механічну природу. Воно обумовлюється об'ємним деформуванням матеріалу та подоланням міжмолекулярних зв'язків, що виникають між притиснутими ділянками поверхонь під час тертя. Об'ємне деформування має місце при терті твердих тіл різної природи. Оскільки поверхні завжди мають нерівності, неоднорідні за своїми механічними властивостями, буде відбуватись занурення більш жорстких елементів поверхні в більш м'яке контртіло. Елемент що занурився при переміщенні у тангенційному напрямку деформує нижній шар матеріалу. Таким чином великого значення при терті набуває адгезійна взаємодія двох твердих тіл. Так відомі спеціалісти в галузі тертя Боуден і Тейбор [4] вважають, що тертя, в основному, обумовлено опором на зсув містків холодної зварки контактуючих (об'ємним деформуванням твердих тіл вони нехтують).

Важливим фактором при терті є відмінність між міцністю адгезійного зв'язку та міцністю шару матеріалу, що лежить нижче. Якщо адгезійний зв'язок має меншу міцність, ніж міцність шару, що лежить нижче, то має місце додатній градієнт механічних властивостей:

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0,$$

де z – глибина матеріалу, σ_x – напруження руйнування в напрямку дотичної площини. За цих умов має місце зовнішнє тертя, так як поверхневі властивості твердих тіл повністю характеризують процес тертя і всі деформації зосереджені у тонкому поверхневому шарі.

Якщо ж виконується умова

$$\frac{d\sigma_x}{dz} < 0,$$

то зв'язок між контактуючими шарами міцніший, ніж зв'язок шару, що лежить нижче і руйнування буде відбуватись у найбільш слабкому місці на значній глибині. У деформуванні будуть приймати участь значні об'єми тіл, опір в дотичній площині буде зумовлений об'ємними властивостями твердих тіл, і тертя перейде у руйнування значних об'ємів контактуючих тіл. В цьому випадку має місце внутрішнє тертя.

Дослідження механізму зовнішнього тертя показує, що воно повністю відрізняється від внутрішнього [7]. Єдина властивість, що поєднує їх, це дисипативність цих процесів.

В чому ж полягають їх основні відмінності?

По-перше, в геометрії взаємодії контактуючих поверхонь. При зовнішньому терті дотик двох твердих тіл виникає в окремих точках, контакт завжди є дискретним, і площа, на якій виникає зовнішнє тертя, залежить від прикладеного навантаження. При внутрішньому терті поверхня дотику є неперервна і не залежить від навантаження.

По-друге, при зовнішньому терті матеріал переміщується в напрямку нормальному до вектора відносної швидкості. Внутрішнє тертя характеризується переміщенням матеріалу в напрямку вектора відносної швидкості.

По-третє, при зовнішньому терті виникнення і руйнування адгезійних зв'язків локалізовано в тонкому поверхневому шарі. При внутрішньому терті зона деформації охоплює весь об'єм.

Таким чином, внутрішнє і зовнішнє тертя принципово відрізняються одне від одного. Це робить неприпустимим підміну одного виду тертя іншим. Отже з вищесказаного можна зробити наступні висновки:

- використання критерію Кулона-Мора з достатньою для практичного використання вірогідністю та розумінням фізичного змісту його параметрів може бути виправдано для силучих та дезінтегрованих середовищ;

- при використанні критерію для визначення граничних станів зв'язаних гірських порід, враховуючи, те що критерій не пов'язує процес руйнування з внутрішніми процесами, які протікають в породі, під термінами “коефіцієнт внутрішнього тертя” та “коефіцієнт зчеплення” потрібно розуміти коефіцієнти лінеаризації огинаючої Мора.

Розуміння цього робить неможливим в подальшому заміну параметрів критерію Кулона-Мора параметрами, одержаними з дослідів на зовнішнє тертя.

Більш того, воно робить безглуздим процес пошуку кореляційних зв'язків цих параметрів з кутами будь-якої природи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. К: Наукова думка, 1976. – 415 с.
2. Разрушение: В 7 т. / Под ред. Г. Либовиц. - М.: Мир, 1976. – Т. 7: Разрушение неметаллов и композитных материалов. – 640 с.
3. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. - М.: Наука, 1990. – 272 с.
4. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. - М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
5. Ягодкин Г.И., Мохначев М.П., Кунтыш М.Ф. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. - М.: Наука, 1971. – 148 с.
6. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород. - М.: Наука, 1967. – 207 с.
7. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
8. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. - М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.

УДК 622.233.3

Л.М. Хныкин, Е.А. Воробьев,
О.А. Гарезина

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ БУРОВЫХ ОРГАНОВ ДЛЯ ВЫЕМКИ УГЛЯ ВЫБУРИВАНИЕМ В ВЫБРОСОПАСНЫХ ПЛАСТАХ

Приведено один із шляхів удосконалення бурових органів для виймання вугілля вибуруванням у викидонебезпечних пластах. Приведений алгоритм розрахунку статично урівноваженого органу для пластів з неоднорідною структурою вугілля дозволяє спроектувати новий тип бурових органів, що забезпечить зниження динамічного навантаження його і ліквідує провокацію викиду.

THE WAYS OF PERFECTION OF DRILLING EQUIPMENT FOR MINING EXTRACTION BY DRILLING IN DANGEROUS OUTBURST LAYERS

One of the ways of improvement of drilling equipment for mining extraction by drilling dangerous outburst layers is given. The given algorithm of statically balanced body calculation for layers with non-uniform structure of coal allows to design a new type of drilling equipment which provides reduction of its dynamic loading, liquidating provocation of emission.

Необходимость обеспечения устойчивого движения коронок вдоль заданного направления в выбросоопасных пластах с неоднородной структурой приводит к специальной задаче – изучения процесса разрушения неоднородного забойного массива существующим буровым инструментом и предъявляет ряд требований к его конструкции:

– снижение динамической нагруженности корпуса буровых коронок в забое скважины, автоматическим уравновешиванием отклоняющих сил на его резах;

– устойчивой пространственной ориентации исполнительного органа вдоль заданного направления за счет использования условия коллинеарности