УДК 621.647.4

І.І. Назаренко, д.т.н. проф. (КНУБА, Київ),
Є.О. Міщук, асистент (КНУБА, Київ)

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ В ЩОКОВИХ ДРОБАРКАХ

Постановка проблеми. Недосконале вивчення процесу руйнування матеріалу в камері подрібнення щокової дробарки, велика кількість теорій руйнування матеріалу, емпіричних залежностей, що не мають теоретичного підґрунтя спонукало до аналізу процесу руйнування в щокових дробарках.

Мета статті. Аналіз процесу руйнування в щокових дробарках.

При подрібненні матеріалу в щокових дробарках руйнуюча порода піддається різним схемам силового навантаження. Подрібнення здійснюється за такою циклічною схемою: роздавлювання – стирання – удар, а також - злом, розколювання. Розглянемо основні методи подрібнення: роздавлювання, удар (стирання відбувається одночасно з роздавлюванням)

Удар. Матеріал подрібнюється шляхом удару. Характеризуючи процес руйнування з точки зору механіки деформуємого твердого тіла, слід відмітити основні фактори, які впливають на процес руйнування: вид матеріалу, швидкість навантаження, залежність напруження від деформації, ступінь неоднорідності напруженого стану, температура. Одним із основних факторів руйнування при ударі є швидкість навантаження. Збільшення швидкості руйнування і зниження температури призводить до крихкого руйнування.

Т. Карман визначає критичну швидкість руйнування при якій зміщення частинок середовища приводить до руйнування за формулою:

$$V_{\text{кр}} = \int_0^{\varepsilon} \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} d\varepsilon \right), \tag{1}$$

де ε – деформація межі міцності;

J – густина.

Дослідженням процесу динамічного руйнування займаються не одне сторіччя. И. А. Остроушко на дослідах по ударному руйнуванню порід стальними шариками отримав зниження енергоємності при збільшенні швидкості руйнування до 50 – 90 м/с. В Ленінградському гірничому інституті були проведені досліди вдавлювання штампа в породу статичним і динамічним (до 5 м/с) шляхом. Ці дані свідчать про велику енергоємність динамічного процесу. По різному проявляються динамічні навантажень на матеріал малих амплітуд і високих частот (вібрацій), це залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів. При динамічному навантаженні міцних порід відбувається процес акумулювання енергії окремих ударів, внаслідок чого з кожним ударом напружений стан породи збільшується і при досягненні границі міцності порода руйнується. В різних дослідженнях вказується на збільшення міцності матеріалів із збільшенням швидкості навантаження. В. Дрейер и Х. Рене отримали експериментальні залежності зміни міцності матеріалів від швидкості навантаження для піщаників і гранітів:

$$\sigma = a + b \lg \frac{V}{V_0}, \tag{2}$$

де a і b – сталі величини; V – швидкість навантаження, $\text{кг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot c^{-1}$; V_0 - швидкість прикладення навантаження $^{\text{м}}\!/_{\text{с}}$.

До основних динамічних характеристик порід слід віднести: швидкість проходження хвиль напружень, масову густину, динамічний модуль загальної і об’ємної деформацій, акустичний опір та інші.

Виникнення в породах напружень у вигляді хвиль, при динамічному навантаженні відмічено як при сильних, так і слабих збудженнях на фронті хвилі, де відбуваються стрибкоподібні зміни швидкості структурних частинок середовища і напружень. Дослідження руху хвиль в густих середовищах при вибуху, ударному навантажені гірських порід є базою на якій формулюються основні задачі і принципи динамічного руйнування порід.

Серед подрібнюваних машин крупного і середнього подрібнення ефект динамічного руйнування найбільш повніше використовується в ударних щокових дробарках (фірма "Крупп"), а також у вібраційних щокових дробарках, які набули широкого використання на сьогодні, за рахунок збільшення степені дроблення в 2-3 рази, зменшених енерговитрат, а також використання явища резонансу для руйнування гірських порід. Встановлення оптимальних швидкостей руйнування, а також врахування інших дискретних параметрів можна досягти оптимального режиму роботи подрібнювальної машини.

Роздавлювання. Кусок матеріалу роздавлюється і стирається між двома поверхнями.

Визначимо теоретичну міцність бездефектного деформованого твердого тіла

Існує три основні методи оцінки теоретичної міцності кристала:

Метод Поляні

$$\sigma_{теор} = \frac{2\gamma}{a}, \tag{3}$$

де γ – поверхнева енергія твердого тіла;

а – параметр кристалічної решітки.

Визначення теоретичної міцності по теплоті сублімації

$$\sigma_{\text{теор}} \approx \frac{Q_c}{N_A} \cdot \frac{1}{a^3}, \tag{4}$$

де Q_c- теплота сублімації; $N_A = 6{,}06 \cdot 10^{23}$моль$^{-1}$ – стала Авогадро;

Розрахунок теоретичної міцності із сил молекулярної взаємодії розглянемо більш детально

Розглядаючи тверде тіло, наприклад граніт, нам відомо з фізики, що він має свою кристалічну решітку, яка в свою чергу складається з атомів. При прикладенні деякої сили, атоми починають рухатись, внаслідок надання ним енергії ззовні. На відносно великих відстанях з'являються сили притягання між атомами, які збільшуються із зменшенням відстані між ними (рис.1, крива 1); на малих відстанях виникають сили відштовхування, які із зменшенням відстані, збільшуються значно швидше ніж сили притягання (рис.1, крива 2). На деякій відстані $r = a_0$ сили відштовхування врівноважують сили притягання і результуюча сила взаємодії перетворюється в нуль, а енергія взаємодії досягає мінімального значення.

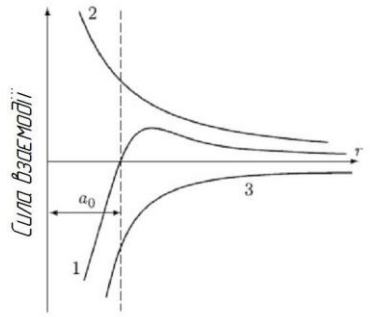

Рисунок 1. Зміна сили взаємодії між атомами.

Атоми кристала не можуть вільно залишати свої положення рівноваги, так як їх енергія збільшується і з'являються сили, які намагаються повернути їх в положення рівноваги. Щоб відірвати атоми один від одного потрібно подолати максимум сили щеплення, яка характеризується теоретичною міцністю на відрив $\sigma_{\text{теор}}$.

При умові що енергія витрачається тільки на утворення одиниці площі нової поверхні кристала, отримаємо теоретичну міцність ідеального кристала:

$$\sigma_{\text{теор}} \approx \frac{E}{2\pi} \approx 0.1E. \quad (5)$$

В таблиці 1 приведені теоретична міцність $\sigma_{\text{теор}}$ розрахована за формулою (5) деяких технічних матеріалів

Таблиця 1. Міцність матеріалів.

Матеріал	Теоретична міцність $\sigma_{\text{теор}}$, 10^{-7} Па	Технічна міцність, $\sigma_{\text{тех}}$, 10^{-7} Па	Відношення $\sigma_{\text{теор}}/\sigma_{\text{тех}}$
Залізо	2100	30	70
Скло	800	8,0	100
Кам'яна сіль	400	0,5	800

Із даних таблиці 1 видно, що технічна міцність твердих тіл на 2-3 порядки нижче їх теоретичної міцності.

Теоретична міцність кристала розрахована по вище наведеній формулі враховує умову подолання сил зв'язку між атомами при одночасному відриву по всьому перерізі тіла з притягненням гіпотези відсутності дефектів решітки в цих тілах. В реальному тілі сили зв'язку долаються неодночасно, в наслідок наявності місцевих дефектів. Руйнування відбувається в результаті виникнення в зонах дефектів тріщин і їх розповсюдженням по перерізу тіла з розділенням його на частини. Вперше така точка зору була висловлена англійським фізиком Гриффітсом; йому належить і метод розрахунку технічної міцності матеріалу.

Розглянемо коротко схему цього розрахунку

Гриффітс розглядав задачу всебічного розтягу нескінченно пружної площини з кінцевим прямолінійним розрізом, і ставиться питання, при якому значенні напруження розтягу σ відбудеться розповсюдження тріщини рис. 2, а. Загальна зміна енергії зразка ΔU, пов'язана з виникненням в ньому тріщини, буде дорівнювати:

$$\Delta U = 2lb\gamma - l^2 b\frac{\sigma^2}{2E}, \quad (6)$$

де l – довжина мікротріщини; b – товщина зразка; γ - поверхнева енергія.

На рисунку 2, б зображена крива залежності U від довжини тріщини l, як видно поки розмір тріщини l залишається менше критичного l_k, її розвиток під дією напруження не вигідний.

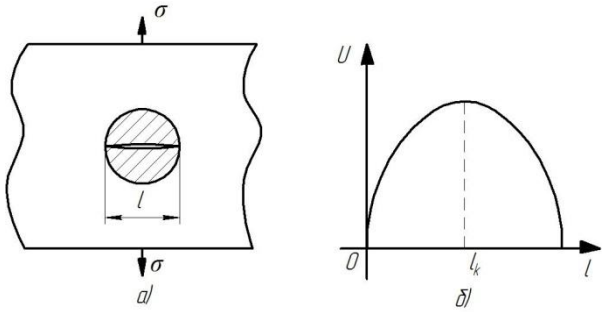

Рисунок 2. Схема до розрахунку міцності:
а) зразок з тріщиною; б) крива залежності енергії U від довжини тріщини l.

Починаючи з $l = l_k$, подовження щілини викликає зменшення енергії зразка, тому відбувається довільне руйнування зразка яке призводить до його крихкого руйнування. Похідна в максимумі кривої (рис.2) має значення:

$$\frac{dW}{dl} = 2b\gamma - Ib\frac{\sigma^2}{E} = 0. \quad (7)$$

Тоді довжина l тріщини:

$$l = {2\gamma E}/{\sigma^2}. \quad (8)$$

Таким чином реальна міцність, твердих тіл, які мають мікротріщини, розраховуємо за формулою:

$$\sigma_p \approx \beta\sqrt{{\gamma E}/{l}}, \quad (9)$$

де β – числовий коефіцієнт.

Отже, для того щоб міцність твердих тіл зменшилась від теоретичного до технічного значення міцності, необхідно, щоб до початку руйнування в них сформувались мікротріщини розміром порядку одиниць мікрон.

На високу анізотропію кристалів також вказує відношення модулів пружності ${E_{макс}}/{E_{мін}}$, яке для деяких кристалів досягає 3. Змінити його можна лиш шляхом значної зміни складу (введення домішок, спостерігається порівняно невелика зміна Е) або внутрішньої структури твердого тіла (за допомогою змін швидкості проходження хвиль, температури, ультразвукове, електрогідравлічне руйнування, електроімпульсна дія на подрібнювальний матеріал і т.д. Є перспективним в розвитку).

Одним із небажаних ефектів який виникає при руйнуванні твердого тіла є пластичність. Розглянемо діаграму зображену на рис. 2. При деякому напруженні σ_s, характерному для кожного матеріалу спостерігається або руйнування кристала, або порушення прямої пропорційності між σ і ε та виникнення залишкової (пластичної) деформації $\varepsilon_{зал.}$. Тому при проектуванні дробарок потрібно мінімізувати ефект пластичності виникаючий при руйнуванні матеріалів.

Для матеріалів, на які розраховуються щокові дробарки, тобто середньої твердості і міцних, границя міцності на стиск коливається в досить вузьких межах: $\sigma_{ст} \approx 2000 \pm 500\,{кг}/{см^2}$.

Руйнування кусків кварциту неправильної форми проводив на пресі А. К. Рундквіст. Діаграма повних зусиль має наступний вигляд (рис. 2).

Розглядаючи діаграму (рис.3) можна зробити висновок по аналогії з щоковою дробаркою, що в перший період руху рухомої щоки (до одної третьої ходу щоки), зусилля дроблення повинні бути незначними і швидко зростати тільки в другій половині робочого ходу щоки, особливо в кінці ходу.

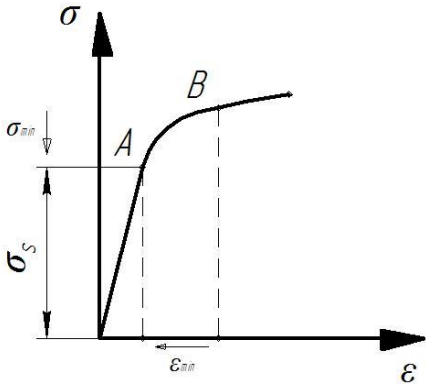

Рисунок 3. Діаграма напруження-деформація.

Також варті уваги були проведені досліди в ВНІІ Буддормаш по руйнуванню кубиків на пресі при концентрації навантаження. Куски граніту і мрамору, розміщували в пресі так щоб тиск на випробовуваний зразок передавався із сторони преса через стержні циліндричної форми, як зображено на рисунку 5.

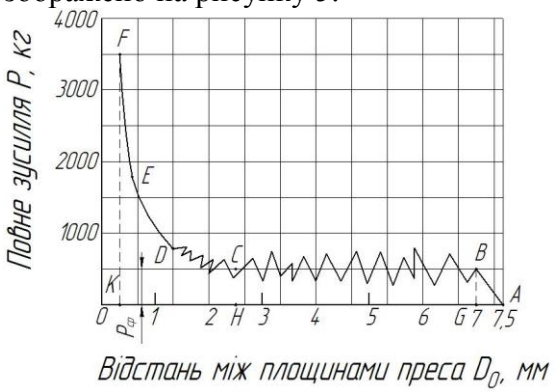

Рисунок 4. Діаграма роздавлювання куска неправильної форми.

Руйнуюче напруження від стиску склало в середньому 145 кг/см^2, в той час як звичайні граничні руйнуючі напруження були рівні в середньому $\sigma_p = 90\,\text{кг}/см^2$. Із схемою роздавлювання по рис.4 схожа робота рифлення в щоковій дробарці, також викликаючих розкол, із даних досліду стає зрозумілим досягнення чистих напружень розтягу є вигідною умовою відносно енерговитрат на руйнування.

Аналізуючи процеси подрібнення в щокових дробарках необхідно врахувати руйнування матеріалу зломом. Розглянемо схему на рисунку 6.

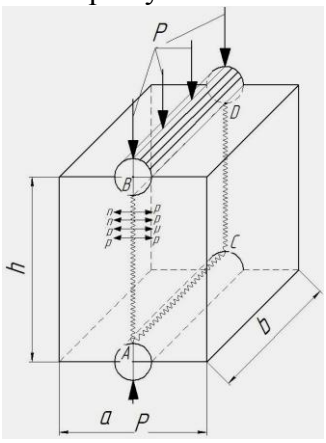

Рисунок 5. Розкол кубика на пресі вдавлюванням стрижнів.

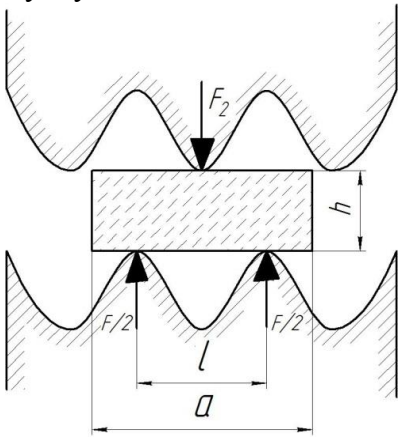

Рисунок 6. Руйнування зломом в дробарці.

Необхідне для руйнування зусилля знайдеться, як при згині балки на двох опорах, з рівняння:

$$\frac{F_2 l}{4} = \sigma_{зг} W, \tag{10}$$

де $W = \frac{bh^2}{6}$ – момент опору поперечного перерізу; F_2 – необхідне зусилля руйнування.

Звідки

$$F_2 = \frac{2}{3}\sigma_{зг}\frac{bh^2}{l}. \tag{11}$$

Відношення зусиль при чистому стиску та злому буде рівне:

$$n = \frac{F_1}{F_2} = \frac{4}{3}\frac{\sigma_{ст}}{\sigma_{зл}}. \tag{12}$$

Границя міцності на злом $\sigma_{зл}$ для матеріалів середньої твердості близька до розтягую чого напруження $\sigma_р$, тобто вона значно менша границі міцності на стиск $\sigma_{ст}$. За дослідними даними для руйнування шматка матеріалу зломом потребуються зусилля менші в 5-10-15 раз, ніж при чистому стиску.

Висновок

Підсумовуючи все вищесказане, можна вважати, що зусилля подрібнення в щокових дробарках набагато менше зусилля, необхідного для руйнування, чистим стиском. Неправильна форма кусків матеріалу спричинює місцеву концентрацію напружень, або приводить до деформації злому.

Враховуючи анізотропію матеріалів, при подрібненні можуть виникати небажані в нашому випадку пластичні деформації. Опираючись на найбільш ефективні з точки зору енергоємності процесу руйнування, напруження розтягу, злому та зсуву, можна спроектувати дробильну машину з оптимальними параметрами, шляхом зміни форм подрібнювальних плит; встановленням оптимальної швидкості руху щоки, забезпечуючи цим більш крихке руйнування породи. Тому визначення нових ефективних шляхів інтенсифікації процесів подрібнення їх регулювання в залежності від технологічних вимог, та успішне поєднання декількох ефектів руйнування має велике практичне значення.

Література

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа. 1977. – 278 с.
2. Левин В.А., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 408 с. – ISBN 5-9221-0514-0.
3. В.С. Блохин, В.И. Большаков, Н.Г. Малич. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: пособие. ч.I - Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2006. – 404 с.
4. Олевский В.А. Конструкция, расчет и експлуатация дробилок. Металургиздат, 1958.
5. Баладинский В.Л. Теория разрушения рабочих сред. 1999 г.