

**Т.А. ОЛІЙНИК**, д-р техн. наук, **П.К. НІКОЛАЄНКО**  
(Україна, кривий Криворізький національний університет)

## **ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ ДРОБЛЕННЯ РУДИ В ШАРІ ПІД ТИСКОМ**

*Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.* Одним з сучасних способів руйнування руди при мінімумі енерговитрат, є міжчастинкове дроблення.

Основним показником роботи дробарного обладнання є гранулометричний склад дробленого продукту. Можливість прогнозування ситового складу продукту після операції дроблення дозволить підвищити ефективність руйнування і селективність розкриття мінералів по межі зерен і в кінцевому підсумку знизити енерговитрати на отримання матеріалу заданої крупності.

*Аналіз досліджень та публікацій.* Для оцінки міцності тіла у вигляді шматка руди застосовується енергетичний критерій руйнування Гриффітса [3], згідно з яким тріщина починає поширюватися в крихкому тілі, якщо швидкість звільнення енергії пружної деформації в процесі її розповсюдження буде більше приросту поверхневої енергії:

$$\frac{d}{dl}U(I_1) - W(P^*, I_1) = 0, \quad (1)$$

де:  $U(I_1)$  – поверхнева енергія тріщини;  $W(P^*, I_1)$  – потенціальна енергія пружних деформацій, обумовлена розкриттям тріщини довжиною  $2I_1$  при впливі на тіло зовнішніх навантажень  $P, P^*$ , де граничне значення навантаження –  $P$ .

Однак, розподіл в шматках руди тріщин, включень, дислокацій та інших нерівномірностей має випадковий характер. Дана модель не містить математичних співвідношень для визначення розмірів тіла і тріщини, таким чином не є повною.

Великі труднощі виникають при оцінці механічних властивостей руди в умовах шару руди. В цьому випадку величини показників міцності і деформації, при інших рівних умовах, буде визначати, перш за все, складний напружено-деформований стан руди, що характеризується взаємодією кожного шматка (об'єму) з іншими шматками.

На практиці використовуються так звані критерії руйнування (міцності), за якими і визначається момент руйнування руди в процесі зовнішнього впливу на неї.

При дробленні матеріалу в ролер-пресі, межчастинкове руйнування руди відбувається за рахунок сил що тиснуть на шар, в якому концентруються розтягуючі і зсувні напруження [1, 2]. При відсутності бокового тиску або малих його значеннях, опір зсува всередині зерна на порядок більше опору зсува по межі. При зсуві, може відбуватися зміщення в напрямку, перпендикулярному поверхні тріщини. При високому бічному тиску і неможливості зміщення, міцність на зсув по межі наближається до міцності зерна. У точці перетину прямої тертя Кулона для межі зерна і обвідної Мора для зерна, міцності вирівнюються, і скол по зернам стає більш імовірним [3].

*Постановка завдання.* У ролер-пресі, при наявності бокового тиску, існує можливість зсуву зерен одного відносно іншого, між валками, через неоднорідність по крупності всього шару матеріалу. Ця умова необхідна для підвищення ефективності руйнування, селективності розкриття мінералів по межі зерен і зниження енерговитрат.

Таким чином, можна припустити, що основною причиною процесу руйнування матеріалу в ролер-пресі, є наявність зсувного механізму руйнування зерен.

Тобто, в якості основної характеристики міцності руд, доцільно використовувати граничне значення зсувної складової напруженого стану; в якості граничного по зсувним напруженням значень використовувати межу пружності, так як межі міцності і позамежної міцності мають у більшості видів руд на порядок меншу зону (область) існування, а також високий коефіцієнт крихкості.

Численними дослідженнями зразків руд на стиснення, встановлені деякі загальні закономірності процесу деформації і руйнування матеріалу. Ці закономірності досить стійкі і дозволяють проводити, з задовільною для практики точністю, опис процесу дроблення руд.

Однією з них, є залежність гранулометричних параметрів руйнування руди від величини роботи зовнішніх сил, яка в процесі дроблення, визначає величину потенційної енергії деформації шматків руди. Таким чином, знаючи величину роботи зовнішніх сил і вихідні розміри шматків руди що руйнуються в шарі, можна оцінити гранулометричний склад на виході процесу руйнування. Ця закономірність визначає підхід до самого процесу, для різних умов дроблення, головним чином, в залежності від вихідного гранулометричного складу руди.

*Викладення матеріалу та результати.* У загальному вигляді формула процесу дроблення має вигляд:

$$E_p = kD^\sigma (R^{3-\sigma} - 1)/3 - \sigma, \quad (2)$$

де:  $E_p$  – енергія, що витрачається на руйнування; ступінь  $\sigma$  у лінійного розміру частинки, знаходиться дослідним шляхом для кожного конкретного випадку дроблення;  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $R$  – ступінь дроблення.

## **Підготовчі процеси збагачення**

На основі вивчення гранулометричного складу руди, отриманої після її руйнування в ролер-пресі, виявлено, що для опису процесу найбільшою мірою підходить окремий випадок, який визначається формулою Бонда у вигляді:

$$W = k(1/\sqrt{d} - 1/\sqrt{D}), \quad (3)$$

де:  $W$  – робота зовнішніх сил, необхідна для руйнування шматка руди;  $D$  – діаметр шматка руди до руйнування;  $d$  – діаметр шматка руди після руйнування;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який визначається дослідним шляхом за формулами опору матеріалів з діаграми стиснення зразка руди у вигляді:

$$k = \sigma_{\max} / 2E_{np}, \quad (4)$$

де:  $\sigma_{\max}$  – значення руйнівного напруження на стиск;  $E_{np}$  – модуль пружності матеріалу шматка руди даного розміру.

З формули (3), отримуємо формулу для обчислення діаметра частинок (шматків) руди після процесу дроблення:

$$d = k^{2.5}D / (W\sqrt{D+k})^{2.5}, \quad (5)$$

Таким чином, алгоритм вирішення задачі напружено-деформованого стану, зводиться до обчислення потенційної енергії деформування шматків руди в шарі, яка потім використовується в формулі 5, для визначення гранулометричної характеристики руди на виході з шару.

Результати моделювання були перевірені при дробленні в ролер-пресі гематитової руди.

Максимальна крупність шматків вихідного живлення дробарки склала 40 мм. У вихідному живленні і розвантаженні ролер-преса визначався гранулометричний склад матеріалу.

Додатково, за допомогою математичної моделі, було виконано розрахунок теоретичної гранулометричної кривої продукту дроблення, для кожного модельованого шматка руди, при певній величині зовнішньої сили.

Результати випробувань і розрахунків представлені на рис. 1 та показують високу збіжність результатів експерименту і моделювання.

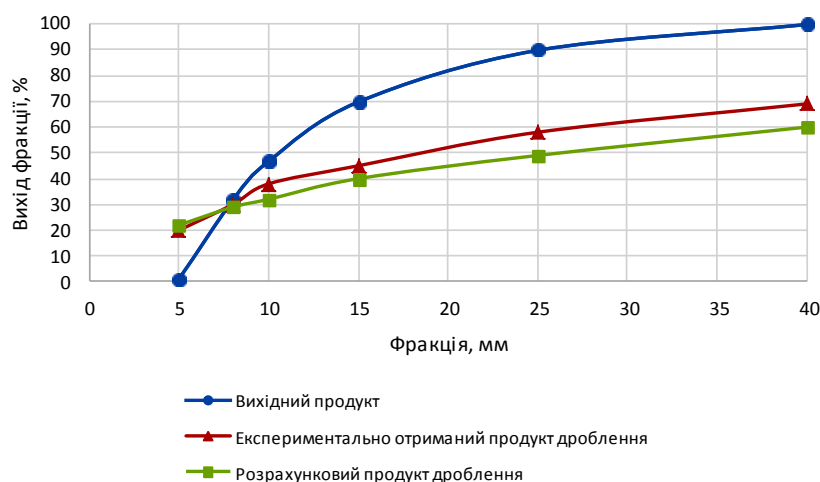


Рис. 1. Гранулометричний склад вихідної руди і продукту дроблення гематитової руди (розрахунковий і отриманий емпіричним шляхом) в ролер-пресі

### Висновки

1. Аналіз процесу дроблення шматків руди в шарі, що здійснюється в ролер-пресі показав, що основною причиною процесу руйнування матеріалу, є наявність зсувного механізму руйнування зерен. Тобто, в якості основної характеристики міцності руд, доцільно використовувати граничне значення зсувної складової напруженого стану; в якості граничного по зсувним напруженням значення використовувати межу пружності.

2. Рекомендовано алгоритм вирішення задачі напружено-деформованого стану, який зводиться до обчислення потенційної енергії деформації шматків руди в шарі, яка потім використовується, для визначення гранулометричної характеристики руди на виході з шару.

3. Дані гранулометричного складу, отримані шляхом моделювання, показали високу збіжність з експериментальними даними.

4. Вивчення межчастинкового руйнування руди на основі теоретичного моделювання дозволяє проводити оптимізацію енергоємності процесу рудопідготовки, що є важливим завданням в області збагачення корисних копалин.

### Список літератури

1. Fuerstenu D.W., Kapur Д.Ї., Gutsche І. Comminution of minerals in a laboratory-size, choke-fed high-pressure roll mill // Mines carriers: Tech. 1994, no 3–4, pp. 24-28.
2. Kellerwessel H.A.M. High pressure particlebed comminution. State of the art, application, recent developments // Engineering and Mining Journal. 1996. Vol. 197, no 2, p. 45.
3. Лейбовиц А. Разрушение. Неорганические материалы. – М.: Мир, 1967. – Т.7, Ч.1.– С. 61-128.

© Олійник Т.А., Николаєнко П.К., 2019

Надійшла до редколегій 04.03.2019  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим