

УДК 621.891

**ВАСИЛЬЧЕНКО Тетяна Олександрівна**, доцент, кандидат технічних наук  
**ШЕВЧЕНКО Ірина Артурівна**, доцент, кандидат технічних наук  
**КОБРІН Юрій Григорович**, асистент

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ УДАРОМ

*Запорізька державна інженерна академія*

Виконано обґрунтування вибору критичної швидкості як критерію руйнування та математичний опис її залежності від розміру частинок і фізико-механічних властивостей крихких матеріалів.

Ключові слова: крихкі матеріали, удар, руйнування, напруження, критична швидкість, дослідження

*Вступ.* Подрібнення рудних і нерудних матеріалів у великих обсягах застосовують у різних галузях промисловості: металургійній, хімічній, гірничодобувній та ін. Важливим є розрахунок ефективності процесу подрібнення з метою прогнозування його результатів на основі заданих конструктивних параметрів дробарки та фізико-механічних властивостей подрібнювального матеріалу. При цьому однією з головних характеристик процесу подрібнення є значення питомої енергії або пов'язаного з нею значення критичної швидкості співударяння, за якої відбувається відділення фрагментів від частинки матеріалу або повне її руйнування.

Відомі емпіричні розрахункові формули не враховують розміри частинок матеріалу, величини яких характеризують поверхневу щільність енергії на розрив та ін. Тому обґрунтування формул, які враховують вплив головних фізико-механічних параметрів матеріалів на розрахунок критичної швидкості процесу подрібнення, є актуальною задачею.

*Аналіз досягнень.* Під подрібненням розуміють процес поділення твердого тіла на частинки заданої крупності механічним шляхом за дією зовнішніх сил, які перевищують сили молекулярного зчеплення.

Подрібнення є енергоємним процесом. За даними ЮНЕСКО людство витрачає на нього до 10 % всієї виробленої енергії. Так, вартість здрибнення в собівартості рудного концентрату складає до 40 % [1].

Подрібнювальні матеріали бувають крихкими і пластичними, твердими та м'якими, сухими і вологими, в'язкими й абразивними тощо.

На відміну від ідеально твердих тіл, механічні властивості крихких матеріалів (зокрема зе-

рен пекового коксу) є неоднаковими у різних напрямках та суттєво впливають на їх механічні властивості і поведінку під час деформації та руйнування за дією зовнішніх навантажень.

Різні способи механічного подрібнення твердих матеріалів відрізняються видом головної незворотної деформації, яка спричинює руйнування. У відповідності з цим умовно виділяють чотири головні способи руйнування:

- роздавлювання, що настає після переходу напружень границі міцності на стиск;
- розколювання, яке настає після переходу напружень границі міцності на розтяг;
- стирання, що відбувається після переходу напружень у зовнішніх шарах кусків границі міцності на здвиг;
- удар, який є дією динамічних навантажень на матеріал, коли руйнування відбувається деформаціями стиску, розтягу, згину та здвигу.

Розрізняють руйнування матеріалу стисненим і вільним ударом. За вільним ударом руйнування матеріалу настає як результат його зіткнення з контактними органами машини під час польоту. Ефект такого удару руйнування визначається швидкістю зіткнення. За стисненим ударом частинки матеріалу руйнується між двома робочими органами машини.

Практично всі способи навантаження матеріалів з метою їх руйнування знайшли застосування в тих чи інших конструкціях подрібнюючих машин. Вибір способу механічної дії на матеріал залежить від його властивостей і технологічних вимог до готового продукту. Так, А. Рейс [2] поділяє всі матеріали на десять груп залежно від способу навантаження (табл. 1).

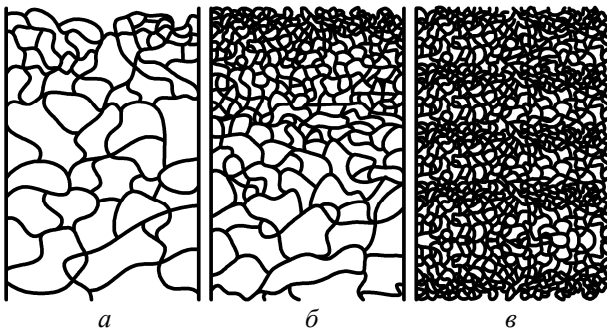
Таблиця 1 – Способи механічної дії залежно від властивостей здрібнених матеріалів (за Рейсом)

Властивості матеріалу	Спосіб навантаження					
	стиск	удар	стирання	відбитий удар	зсув	різання
Твердий:						
- що сколюється	x	x	-	x	-	-
- крихкий	x	x	-	x	-	-
- в'язкий	x	x	-	-	-	-
Середньої твердості	x	x	-	x	0	-
Пружний, м'який	-	-	x	-	x	X
Волокнистий	0	-	x	x	x	X
Чутливий до теплоти	-	0	-	0	x	X
Волого-пластичний	0	-	x	-	x	X
М'який:						
- крихкий	x	x	x	x	x	X
- в'язкий	x	x	0	0	x	X

*Примітка:* Застосування способу навантаження: x – застосовують; 0 – обмежено застосовують; «-» – не застосовують

З табл. 1 впливає що найбільш розповсюдженими для крихких матеріалів, є способи навантаження ударом і стиском.

Представляє інтерес вплив виду ударного навантаження на змінювання мікроструктури зразків, що руйнуються (рис. 1). Вільна ударна дія має велику ефективність порівняно із стисненим ударним руйнуванням, причому в цьому разі змінювання відбуваються більше у поверхневих шарах [3].



**Рисунок 1** – Змінювання мікроструктури частинок твердого тіла за різних типів механічної дії впливу: а - вихідний зразок; б - після стисненого удару; в - після вільного удару

Спосіб подрібнення обирають з урахуванням фізичних властивостей подрібнювального матеріалу, в першу чергу його твердості та характеру зламу. Для матеріалів із значною твердістю більш ефективним є удар і роздавлювання, для в'язких матеріалів краще стирання, для крихких – розколювання. Велике подрібнення м'яких і крихких матеріалів бажано виконувати роздавлюванням, середнє та дрібне – ударом.

У більшості випадків відбувається комбінована дія подрібнювальних зусиль з переважанням одного з них. Наприклад, роздавлювання зі стиранням, удар з роздавлюванням і стиранням, іноді до головних зусиль приєднуються побічні, що вигинають і розрізають.

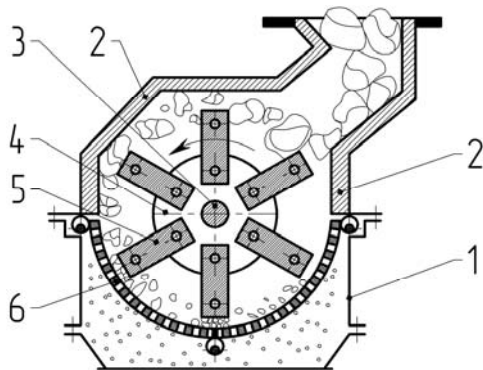
Як правило, у подрібнювачах застосовують наступні комбінації різних способів руйнування матеріалу: руйнування ударом і стиранням за дії на матеріал робочих органів, які швидко обертаються; руйнування стиском і зсувом (сколюванням і кришенням) за дії на матеріал двох поверхонь, одна з котрих рухається швидко, а інша рухається з незначною швидкістю, або залишається нерухомою; руйнування стиском, зсувом і стиранням за дії на матеріал двох поверхонь, одна з яких є рухомою, а друга – нерухомою; руйнування роздавлюванням або прокаткою (стиском) частинок між двома поверхнями, що рухаються з однаковими швидкостями.

Метод подрібнення, а значить і тип машини обирають відповідно до вимог технологічного процесу та фізичних властивостей подрібнюваного матеріалу.

Руйнування ударом крихких матеріалів реалізують різноманітними конструктивними схемами у дробарках ударної дії, серед яких найбільше застосування знайшли звичайні молоткові дробарки [4].

У молоткових дробарках переважає руйнування в результаті вільного удару. Куски сировини, що подають до молоткової дробарки (рис. 2) зазнають удари від молотків, шарнірно підвішених до ротора, що обертається. У процесі подрібнення частинки матеріалу відкидаються на відбійні плити, співударяються між собою та

знову прямують до молотків. Крупні куски, що залишилися, подрібнюються об колосникові грати.



**Рисунок 2** – Схема молоткової дробарки: 1 - корпус; 2 - відбійні плити; 3,4 - вал і ротор; 5 - молоток; 6 - колосникові грати

Дослідники визначають особливість матеріалу зазнавати руйнування за ударом через критичну швидкість руйнування  $v_{кр}$ , коли частинки матеріалу повністю зруйнуються [5]. Тому актуальною задачею досліджень за даним напрямком є вивчення фізико-механічних показників процесу руйнування.

*Постановка завдання.* Завданням роботи є дослідження процесу руйнування крихких матеріалів ударом і визначення формул критичної швидкості їх руйнування.

*Головна частина досліджень.* Проблемам руйнування матеріалів присвячено багато досліджень, проте на теперішній час ще не розроблено загальної теорії, яка дозволяє достатньо точно пояснити складні процеси подрібнення. Існує декілька гіпотез запропонованих різними авторами, які трактують теоретичні основи процесів руйнування твердих матеріалів.

Найбільш достовірні результати дає гіпотеза П.А. Ребіндера [3], яка за деяким уточненням дозволяє правильно підійти до аналізу енергетичних витрат на здрібнення матеріалів. В узагальненому законі П.А. Ребіндера вся енергія на подрібнення витрачається на деформацію тіла до моменту початку руйнування та на утворення нових поверхонь під час руйнування. Загальні витрати енергії дорівнюють:

$$Q = k_V \cdot V + k_S \cdot \Delta S, \quad (1)$$

де  $k_V$ ,  $k_S$  – коефіцієнти, які характеризують процес;  $V$  – об'єм тіла;  $\Delta S$  – площа заново утворених поверхонь частинок після руйнування тіла.

Вся енергія складається як сума двох енергій, першу з яких визначають за законом Кірпічова-Кіка [3], а другу – за законом Реттінгера [6].

Запропоновані гіпотези вчених для часткових випадків не дозволяють достатньо точно визначити розрахунковим шляхом необхідні показники процесу руйнування частинок матеріалів. На руйнування частинок матеріалу значно впливає виникнення та розвиток тріщин внаслідок прикладених навантажень. Концентрація енергії щодо фронту тріщин сприяє руйнуванню частинок матеріалу за більш низьких напружень, чим це необхідно для порушення однорідної структури.

А.А. Гриффітсом [8] вперше встановлено енергетичні умови розвитку тріщин, визначено критичну довжину тріщини, за досягненням якої вона після зняття навантажень не заплющується повністю. Це призводить до сприятливих умов для концентрації навантажень і подальшому розвитку тріщин за наступним навантаженням. Їх критична довжина в межах 1-10 мкм залежить від властивостей матеріалу. Пояснення А.А. Гриффітсом явища крихкого руйнування базуються на понятті необхідної енергії для розповсюдження тріщин [7].

Важливою характеристикою механіки руйнування матеріалу є коефіцієнти інтенсивності напружень. Тому під час аналізу процесу руйнування тіл від удару виділяють дві задачі: визначення залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень від часу для стаціонарної тріщини (тобто, коли швидкість її розповсюдження дорівнює нулеві), від часу і швидкості – для нестационарної тріщини; визначення закону зростання напружень за нестационарним режимом, якщо відомою є залежність поверхневої енергії від швидкості розвитку дефекту.

Розглянемо частинку крихкого матеріалу як об'єкт руйнування. Для цього можна скористатися сучасною концепцією руйнування тіла в результаті силової динамічної дії на нього під час розвитку тріщин, що вже є в ньому та заново з'являються.

За аналізом процесів розповсюдження тріщин у тілі, що руйнується, звичайно використовують формулу А.А. Гриффітса. Вона описує умови балансу енергії, яку підводять до тіла зовні, й енергії, яку витрачають на утворення в результаті розвитку тріщин нових поверхонь у тілі. Так, для сферичної тріщини маємо:

$$\sigma = 2\sqrt{\frac{q \cdot E}{R}}, \quad (2)$$

або

$$2q = \frac{\sigma^2 \cdot R}{2E}, \quad (3)$$

де  $\sigma$  – напруження;  $q$  – питома поверхнева енергія руйнування;  $E$  – модуль пружності тіла;  $R$  – радіус тріщини.

Питому поверхневу енергію руйнування для пружно еластичних матеріалів визначають як суму питомої поверхневої енергії пружної деформації  $q_k$  і питомої енергії пластичної деформації  $q_n$ :

$$q = q_k + q_n. \quad (4)$$

Якщо прийняти умовно, що руйнування крихких матеріалів відбувається за рахунок пружних деформацій еліптичної тріщини, то згідно формулі Гриффітса:

$$q_k = (\sigma_k \cdot \sqrt{\ell})^2 \frac{\pi}{2E}, \quad (5)$$

де  $\sigma_k$  – границя міцності матеріалу на розрив;  $\ell$  – довжина тріщини.

Якщо тріщина є сферичною з радіусом  $R$ , то отримують надану вище формулу (2). Згідно М. А. Махутову [9], питому енергію пластичної деформації може бути наближено визначати за формулою:

$$q_n = \frac{2}{3} \sigma_T \cdot e_T \cdot S_T, \quad (6)$$

де  $\sigma_T$  – тимчасовий опір матеріалу на розрив за пластичної відносної деформації  $e_T$ ;  $S_T$  – товщина шару руйнування, який деформують пластично.

За розвитком тріщини виникають три головні види деформації поверхневої тріщини: нормальне відривання, поперечне та повздовжнє зсування. В частинці крихкого матеріалу залежно від її форми, а також напрямку ударного імпульсу можуть бути реалізованими всі види деформацій.

Розглянемо випадок, коли частинка має форму куба зі стороною  $b$ , а поверхні молотка та відбійної плити прийняті як площина.

В цьому разі може відбуватися прямий удар ( $\alpha = 0$ ) або удар з відхиленням на кут  $\alpha$  ( $\alpha \neq 0$ ). Під час удару молоток надає частинці ударного імпульсу:

$$S = m \cdot v_{y0} \cdot (1+k), \quad (7)$$

де  $m$  – маса частинки;  $v_{y0}$  – колова швидкість молотка у точці співударяння;  $k$  – умовний коефіцієнт відновлення нормальної швидкості матеріалу частинки за ударом.

Якщо удар відбувається з відхиленням від прямого ( $\alpha \neq 0$ ), то на момент удару виникають нормальна  $P_n$  та дотична  $P_\tau$  складові сили:

$$P_n = P \cdot \cos \alpha; \quad (8)$$

$$P_\tau = P \cdot \sin \alpha. \quad (9)$$

За таким ударом від нормального напруження виникає деформації нормального відривання або поперечного зсування, а від дотичної – деформація повздовжнього зсування. Одночасно деформація тіла є можливою внаслідок нормального відривання та повздовжнього зсування або поперечного та повздовжнього зсування.

Якщо виходити з того, що частинка руйнується за умови, коли довжина тріщини  $\ell$  досягне її розміру ( $\ell = b$ ), то формула для розрахунків критичної швидкості  $v_{kp}$  співударяння молотка з частинкою, за розвитком у ній в результаті удару напружень нормального відривання або поперечного зсування, має вигляд:

$$v_{kp} = \frac{T}{\rho \cdot \cos \alpha} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot q \cdot E}{(1-\mu^2) \cdot b^3}}, \quad (10)$$

де  $T$  – час ударного імпульсу;  $\rho$  – щільність матеріалу;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

У випадку прямого удару за  $\alpha = 0$ :

$$v_{kp} = \frac{T}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot q \cdot E}{(1-\mu^2) \cdot b^3}}. \quad (11)$$

За ударом молотка по частинці матеріалу в дробарках ударної дії частинка за час  $T_1$  ударного імпульсу набуває швидкості  $v_{y0}$  точки молотка, де відбувся удар, і за рахунок пружних властивостей відлетить від молотка.

Швидкість співударяння частинки з відбійною плитою має вигляд  $v_{y0} \cdot (1+k)$ . Якщо удар відбудеться з відхиленням від нормалі на кут  $\beta$ , то:

$$P_n = v_{y0} \cdot (1+k) \cdot \cos \beta; \quad (12)$$

$$P_\tau = v_{y0} \cdot (1+k) \cdot \sin \beta. \quad (13)$$

Оскільки більшість дробарок ударної дії працюють за розглянутою схемою, раціональним є руйнування частинок матеріалу за рахунок удару по ним молотка й удару частинки об відбійну плиту. В цьому разі за першим ударом утворюється тріщина довжиною –  $\ell_1$ , за другим –  $\ell_2$ , а її загальна довжина дорівнює  $\ell = \ell_1 + \ell_2$ .

Тоді під час руйнування частинки в результаті двох ударів (співударяння частинки з молотком і відбійною плитою), з урахуванням  $\ell = b$ ,  $T_1 \approx T_2$  ( $T_2$  – час ударного імпульсу за ударом частинки об відбійну плиту), критична швидкість (початок інтенсивного руйнування) має вигляд:

$$v_{kp} = \frac{T}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot q \cdot E}{b^3 \cdot [1 + (1+k)^2]}}. \quad (14)$$

Рівняння (12) має сенс у разі, коли  $\text{tg } \alpha < f$  і  $\text{tg } \beta < f$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя частинки ма-

теріалу об поверхню молотка або відбивної плити.

Таким чином, за формулою (8) можна розрахувати критичну швидкість удару дробарки під час подрібнення частинок матеріалу з урахуванням одного удару, а за формулою (12) – критичну швидкість з урахуванням першого удару молотків по частинці матеріалу та другого удару за її відскоком.

Одержані залежності (8) і (12) наряду з такими параметрами, яка модуль пружності  $E$ , щільність  $\rho$ , розмір частинок матеріалу  $b$ , враховують коефіцієнт  $S$ , який характеризує питому поверхневу енергію руйнування, а також час ударного імпульсу  $T$ , коефіцієнти відновлення  $k$  і Пуассона  $\mu$ , тобто є всі головні параметри про-

цесу ударної обробки матеріалу під час його подрібнення. Це свідчить про методологічну обґрунтованість розрахункових формул критичних швидкостей, які витікають з теорії утворення та розвитку тріщин.

*Висновки.* Найбільш суттєво на процес руйнування крихких матеріалів впливають його механічні властивості та спосіб прикладення механічного навантаження (удар, стиск і т.д.).

Одержані формули для розрахунків критичних значень швидкості співударяння частинок матеріалу з молотком і відбійною плитою дробарки можуть бути застосованими під час визначення конструктивно-технологічних параметрів молоткових дробарок.

### Бібліографічний список

1. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых [Текст] / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
2. Баренблатт, Г. И. О некоторых общих представлениях математической теории хрупкого разрушения [Текст] / Г. И. Баренблатт // Прикладная математика и механика. – 1964. – № 4. – С. 630-643.
3. Ходаков, Г. С. Физика измельчения [Текст] / Г. С. Ходаков. – М. : Наука, 1972. – 307 с.
4. Косарев, А. И. Молотковые дробилки для промышленности строительных материалов [Текст] / А. И. Косарев, Д. С. Силенок. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1979. – 40 с.
5. Дмитриева, Л. А. Исследование процесса измельчения хрупких материалов [Текст] : дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Дмитриева Любовь Анатольевна. – Иваново, 2006. – 165 с.
6. Левченко, О. О. Проблемы дробления и моделирования процесса дробления горячего агломерата [Текст] / О. О. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского горно-металлургического института. – Алчевск : ДонГМИ, 2004. – Вып. 18. – С. 178-186.
7. Морозов, Н. Ф. Математические вопросы теории трещин [Текст] / Н. Ф. Морозов. – М.: Наука, 1984. – 255 с.
8. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения [Текст] / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1974. – 312 с.
9. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч.1: Критерии прочности и ресурса [Текст] / Н. А. Махутов. В 2 ч. – Новосибирск: Наука, 2005.– 494 с.

**ВАСИЛЬЧЕНКО Татьяна Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургического оборудования, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: pepipp@mail.ru

**ШЕВЧЕНКО Ирина Артуровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургического оборудования, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: iashevia@yahoo.com

**КОБРИН Юрий Григорьевич**, ассистент кафедры металлургического оборудования, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: ku\_76@yahoo.com

### АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ УДАРОМ

Выполнены обоснование выбора критической скорости в качестве критерия разрушения и математическое описание ее зависимости от размера и физико-механических свойств хрупких материалов.

Ключевые слова: удар, разрушение, напряжения, критическая скорость, исследование

**VASILCHENKO Tatiana**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgical Equipment, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: pepipp@mail.ru

**SHEVCHENKO Iryna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metallurgical Equipment, Zaporizhska state engineering academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: iashevia@yahoo.com

**KOBRIN Yuriy**, Assistant of Department of Metallurgical Equipment, Zaporizhska State Engineering Academy (Zaporizhzhya, Ukraine). E-mail: ku\_76@yahoo.com

## **ANALYSIS OF THE PROCESS OF FABRICATION OF BRITIOUS MATERIALS WITH SHOCK**

The substantiation of a choice of a critical speed as criterion of destruction and a mathematical description of its dependence on the size and physics-mechanical properties of brittle materials are given.

Keywords: impact, destruction, stresses, critical velocity, study

Стаття надійшла до редакції 20.09.2017 р.  
Рецензент, проф. Й.К. Огинський

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>