

Сідашенко О.І.,

Лузан С.О.

Харківський національний  
технічний університет  
сільського господарства  
імені П.Василенка,  
м. Харків, Україна,  
E-mail: khadi.luzan@gmail.com

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОДРІБНЕННЯ СУМІШЕЙ РІЗНОМІЦНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 631.3.004.8:339.13

*Розглянуто теоретичні основи подрібнення різноміцних компонентів в суміші. Досліджено кінетику подрібнення оксидів алюмінію і заліза, а також їх суміші. Запропоновано модель процесу спільного подрібнення фракцій різних матеріалів.*

**Ключові слова:** подрібнення, механоактивація, компоненти, суміш, фракція, оксид.

**Вступ.** Процес подрібнення – це процес створення не тільки нових поверхонь твердого тіла. Подрібнення – це складний фізико-хімічний процес збільшення потенційної енергії речовини, поверхневої енергії, енергії внутрішньої будови і, як наслідок, підвищення хімічної активності [1]. Змінюючи режими і середу механоактивації, можна управляти властивостями матеріалів, отримувати нові матеріали і фази, в тому числі нерівноважні і аморфні. Механоактивація - процес утворення хімічно активної речовини шляхом механічного подрібнення. Метод механоактивації вважається одним з найбільш простих для отримання нанокристалічного стану в твердих тілах [2, 3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Механоактивація в млинах є найбільш поширеною. Причина цього простота проведення обробки матеріалу, а також те, що млин є одним з найпоширеніших апарата, в яких здійснюється механічне водєйствія на речовину. Разом з тим, і механіка, і фізика процесів, що відбуваються в таких апаратах, залишається предметом численних досліджень [4]. Велика частина цих досліджень присвячена оптимізації процесу подрібнення - процесу, головним в якому є отримання максимальної поверхні твердої речовини при мінімальних витратах енергії.

Процес руйнування матеріалів при навантаженні розглядається на основі кінетичної теорії міцності, згідно з якою міцність твердих тіл залежить від температури і часу дії сили. В процесі подрібненні час дії навантажень малий, і при звичайній температурі для пояснення тимчасової міцності залучаються уявлення Гриффитса [4] про зародкові тріщини. Значення фактичної міцності з урахуванням наявності в тілі деякої чечевиче-подібної «небезпечної» тріщини довжиною  $l$  складає:

$$P_p = \sqrt{\frac{2E\sigma}{\pi l}}. \quad (1)$$

При  $P > P_p$  тріщина зростає і тіло руйнується, при  $P < P_p$  тріщина зникається і зникає.

Теорія зародження тріщин в кристалах в результаті зсуву ґрунтувалася на дислокаційній моделі. Процес подрібнення розглядається у фізиці руйнувань, як руйнування твердих тіл послідовною серією механічних впливів [4].

Кінетична концепція міцності твердих тіл, запропонована С. І. Журковим, обґрунтувала руйнування як термодинамічний процес і дозволяє прогнозувати руйнування на мікро і макро рівні. Раніше руйнування зразка при одноосьовому розтягуванні можна було передбачити з логарифмічною точністю за рівнянням, що описує довговічність:

$$\tau = \tau_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma/kT), \quad (2)$$

де  $\sigma$  – механічне напруження;  $T$  – температура зразка;  $U_0$  – енергія активації процесу руйнування;  $\tau_0$  – період міжатомних коливань;  $k$  – коефіцієнт Больцмана;  $\gamma$  – параметр, пов'язаний з властивостями матеріалу.

На основі експериментального дослідження кінетики накопичення і розвитку суб-мікроскопічних тріщин [5] методом малокутового рентгенівського розсіювання були обчислені розміри тріщин і їх концентрація. Далі дослідженнями Куксенко В.С, Слуцкера А.І. і Тамужа В.П. [6] було визначено, що розміри початкових мікротріщин обумовлені структурою матеріалу, яка як формує локальні перенавантаження, так і обмежує їх зростання на кордонах гетерогенності. Встановлено, що кінетика накопичення мікротріщин визначає довговічність навантаженого зразка, і залежність швидкості накопичення мікротріщин ( $\dot{C}$ ) описується рівнянням такого вигляду:

$$\dot{C} = \dot{C}_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma/kT). \quad (3)$$

Визначальну роль в руйнуванні матеріалів грає передрозривна концентрація мікротріщин, яка не залежить від режиму навантаження, а залежить тільки від розмірів утворилися мікротріщин. Ця концентрація може приймати великі значення при переході від руйнувань на мікро рівні до руйнувань на макро рівні.

В результаті статистичних узагальнень в відділі фізики міцності ФТИ імені О.Ф. Іоффе РАН була запропонована модель руйнування гетерогенних матеріалів, що базується на кінетичній моделі міцності і, яка складається з двох стадій [7]. Головна гіпотеза моделі полягає в тому, що дефекти (тріщини) накопичуються на першій стадії і потім прискорено розвиваються на другій заключній стадії. Модель була заснована на фізично обґрунтованих умовах прогнозування руйнування, апробованих на різних об'єктах з використанням акустичної та сейсмічної емісії [8]. На першій стадії відбувається накопичення одиночних стабільних мікротріщин у всьому обсязі тіла, що через флуктуації концентрації тріщин призводить до утворення комплексів кластерів близько розташованих тріщин, здатних до взаємодії, злиття і формуванню вогнища руйнування. На другій стадії відбувається локалізоване розвиток вогнища руйнування, в результаті чого з'являється магістральна тріщина, і зразок руйнується.

Крім моделі руйнування авторами [6] був виведений концентраційний критерій  $k = r_i/l$ , де  $l$  – розмір тріщин, що утворюються,  $r_i$  – середня відстань між тріщинами. Цей критерій визначає перехід від однієї стадії до другої. Визначено, що активне утворення починається при  $k \approx 3$ .

Першими дослідженнями, присвяченими проблемі сухого (Холмса і Патчінга) і мокрого (Д.В. Фюрстенау) подрібнення сумішей різних мінералів, встановлено, що подрібнення кварцу і вапняку в суміші дає продукти, характеристики крупності яких до певної міри подібні характеристикам крупності, отриманим при роздільному подрібненні кожного мінералу.

Своїми дослідженнями Л.Ф. Біленко [9, 10] довів положення про незалежне подрібненні різномісних компонентів в суміші. Причому встановлено, що характеристика крупності компонента, подрібненого в суміші з іншим компонентом, залишається такою ж, як і при роздільному подрібненні його до тієї ж крупності. При подрібненні суміші різномісних матеріалів коефіцієнт випереджувального подрібнення, що показує ступінь попереднього помелу твердого компонента в схемі подрібнення двокомпонентних сумішей, не залежить від кількості твердої складової в суміші, а визначається тільки властивостями подрібнюють матеріалів.

**Постановка проблеми.** Метою даної роботи є обґрунтування закономірностей подрібнення сумішей різномісних матеріалів, використовуваних для створення композиційних матеріалів із застосуванням механоактивації.

**Основна частина.** Подрібненням називається процес руйнування (деформування) твердих тіл під дією зовнішніх сил (наприклад, механічних, теплових і ін.). Руйнування (деформування) тіл, наприклад гірських порід, під дією зовнішніх механічних сил відбувається переважно по ослабленим перетинам, тріщинуватим і іншим дефектним місцям після переходу за межу міцності (пружності). Подрібнення умовно поділяється на дроблення, коли виходить продукт розміром більше 5 мм, і помел - продукт розміром менше 5 мм. Залежно від виду деформації тіл (характеру прикладення зовнішніх сил) застосовуються такі способи подрібнення: роздавлювання, розколювання, злам, удар і стирання. Перераховані способи подрібнення є спільними як для дроблення, так і для помелу і в більшості випадків присутні в поєднанні, наприклад, роздавлювання і стирання, удару і стирання і т. д. [11].

Подрібнення характеризується ступенем подрібнення (дроблення) і, яка визначається відношенням середніх розмірів матеріалу до і після подрібнення:  $i = D_{cp}/d_{cp}$ . Величина ступеня подрібнення досягає 1000 і визначається фізико-механічними властивостями і розміром матеріалу і конструкцією машини. Розрізняють дроблення велике ( $d_{cp} = 100 \dots 350$  мм), середнє ( $d_{cp} = 40 \dots 100$  мм) і дрібне ( $d_{cp} = 5 \dots 40$  мм). Для дроблення матеріалу використовуються дробарки. Ступінь дроблення в сучасних дробарках не перевищує 30.

Помел матеріалу буває грубий ( $d_{cp} \geq 0,1$  мм), тонкий ( $d_{cp} = 0,1 \dots 0,05$  мм) і надтонкий ( $d_{cp} < 0,05$  мм) і здійснюється в млинах різних конструкцій.

Для подрібнення тіла до необхідного розміру необхідно затратити певну кількість енергії, що залежить від його розміру, міцності, форми, вологості, умов подрібнення і інших параметрів. Існує кілька теорій оцінки витрат енергії на подрібнення матеріалів.

Вперше гіпотеза про те, що робота, яка витрачається на подрібнення матеріалу, пропорційна новоствореній поверхні була запропонована П. Ріттингером в 1867 році [12]. Звідки випливає, що така робота переходить в вільну поверхневу енергію в еквівалентних кількостях:

$$A = k_p S, \quad (4)$$

де  $A$  – питома робота подрібнення;  $k_p$  – коефіцієнт, який визначає роботу, затрачену на виробництво одиниці поверхні.

Однак, Гіпотеза Ріттингера застосовна тільки при дрібному дробленні і помолі матеріалів з огляду на невелику похибку в оцінці витрат енергії на подрібнення. Практичне значення гіпотези невелике, так як важко визначити коефіцієнт пропорційності.

Відповідно до закону Кирпичева - Кіка, отриманого з теорії пружності, для руйнування ідеально крихкого тіла обсягу  $V$  потрібно зробити роботу, рівну:

$$A = \frac{P_0}{2E} V = k_k V, \quad (5)$$

де  $P_0$  – межа міцності;  $E$  – модуль Юнга;  $k_k$  – коефіцієнт пропорційності.

Ця теорія справедлива для великого і середнього дроблення, де енергія витрачається в основному на деформацію матеріалу.

У 1940 р П. Ребиндер запропонував розрахункову формулу, в якій об'єднана робота, що витрачається на деформацію і утворення нових поверхонь:

$$A = k_p S + k_k V. \quad (6)$$

Дана формула Ребиндера також не отримала практичного застосування через відсутність рекомендацій щодо вибору значень коефіцієнтів пропорційності.

Існують і інші теорії процесів руйнування, такі як теорія Ф. Бонда, по якій робота, витрачена на подрібнення, пропорційна збільшенню параметра, що є середньгеометричним між обсягом і поверхнею. Досить численні спроби розвитку теорії подрібнення з повнішим урахуванням реальної структури і фізичних властивостей твердих тіл, впливу середовища, в якій йде подрібнення на сучасному етапі.

Порошкові матеріали, що надходять на механоактиваційну обробку, являють собою суміш окремих частинок різного розміру, розділених на класи відповідно до гранулометричного складу вихідного матеріалу. Відомо, що частинки різної величини одного і того ж матеріалу володіють різними властивостями: міцністю, пружністю, здатністю до подрібнення [13], тим більше різних матеріалів, як в нашому випадку. Є результати, які підтверджують незалежність подрібнення різноміцних компонентів в суміші [14], тоді можна припустити, що інгредієнти суміші для синтезування композиційних матеріалів із застосуванням СВС-процесу, подрібнюються кожен за своїми законами незалежно один від одного.

З метою підтвердження гіпотези про незалежне подрібнення часток різних матеріалів і фракцій крупності було здійснено експериментальне подрібнення оксидів алюмінію і заліза гранулометричного складу 40-70 мкм і 63-100 мкм відповідно. Подрібнення здійснювалося на кульовому млині протягом 2, 6, 10 хв.

На рис. 1 представлена кінетика окремого подрібнення оксидів  $Al_2O_3$  та  $Fe_2O_3$ .

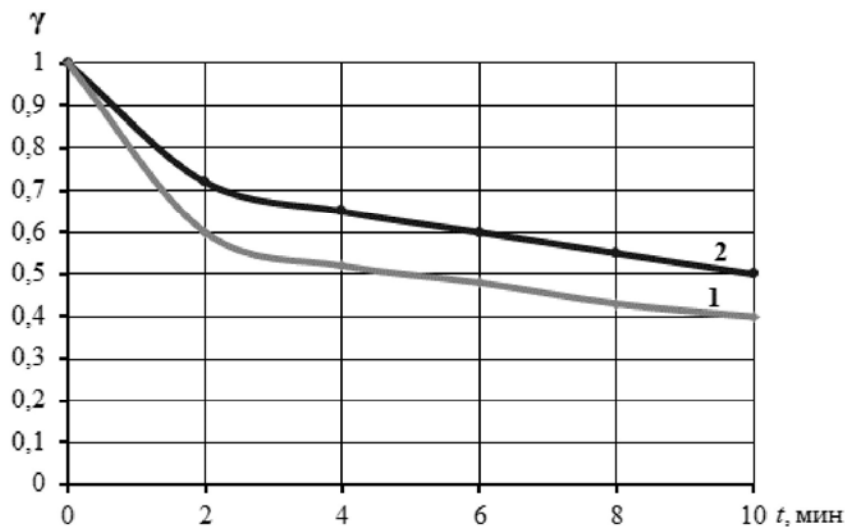


Рис. 1 – Кінетика подрібнення оксидів  $Al_2O_3$  (40-70 мкм) (2) та  $Fe_2O_3$  (40-70 мкм) (1)

З рис. 1 видно, що характер кінетики подрібнення оксидів алюмінію і заліза однаковий. Аналіз кінетики подрібнення здійснювався за величиною залишків ( $\gamma$ ) на контрольному ситі розміром 0,04 мм.

Для зіставлення кінетики окремого подрібнення фракцій з їх подрібненням в суміші розраховувалися середньозважені залишки обраних фракцій в суміші, тобто

$$\gamma_{\text{см мат}}^i = \gamma_1 R_1^i + \gamma_2 R_2^i, \quad (7)$$

де  $R_j^i$  – залишок  $j$  фракції на  $i$  ситі;  $\gamma_j$  – вихід  $j$  фракції в гранулометричному складі вихідного продукту.

Таким чином, вироблялося моделювання процесу спільного подрібнення фракцій різної крупності.

На рис. 2 показана кінетика подрібнення суміші матеріалів (50%  $Al_2O_3$  та 50%  $Fe_2O_3$ ) (1) і змодельованої суміші (2), обчисленої за результатами подрібнення окремих фракцій (7).

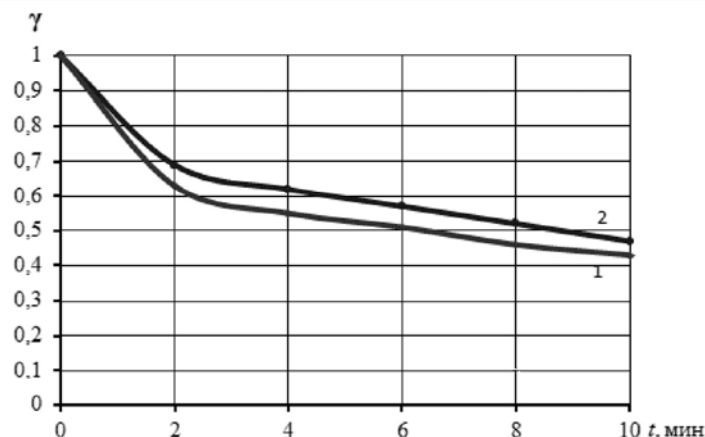


Рис. 2 – Кінетика подрібнення суміші матеріалів (50%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та 50%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (1) і змодельованої суміші (2).

Однаковий характер і досить близьке їх розташування кінетичних кривих підтверджує гіпотезу про незалежність подрібнення частинок різних матеріалів і фракцій крупності при їх спільному подрібненні в суміші.

**Висновки.** На основі результатів експериментальних досліджень встановлено, що кінетика незалежного подрібнення компонентів суміші оксидів алюмінію і заліза різного гранулометричного складу має однаковий характер.

Кінетика подрібнення суміші матеріалів (50%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та 50%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) добре узгоджується з кінетикою подрібнення змодельованої суміші, відповідно виразу (7), що дозволяє моделювати процес спільного подрібнення різних матеріалів.

#### Література:

1. Молчанов В.И. Активация минералов при измельчении / Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. – Недра, 1988. – 208 с.
2. Дугуев С.В. Тонкое и сверхтонкое измельчение твердых материалов – путь к нанотехнологиям / Дугуев С.В., Иванова В.Б. // Строит. материалы. – 2007. – № 11 (635). – С. 29-31.
3. Ломаева С.Ф. Температурная стабильность  $\text{Fe}_3\text{C}$  в системах, полученных механоактивацией железа в жидких органических средах / С.Ф. Ломаева, Н.В. Иванов, Е.П. Елсуков [и др.] // Журн. структ. химии. – 2004. – Т. 45. – С. 163-171.
4. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий / [В.В. Болдырев, Е.Г. Аввакумов и др.]; под ред. Е.Г. Аввакумов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2009. – 343 с.
5. Тамуж В.П. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В.П. Тамуж, В.С. Куксенко. – Зинатне. Рига. – 1978. – 294 с.
6. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушений крупномасштабных объектов / В.С. Куксенко // ФТТ, 2005, том 47, вып. 5. – С. 788-794.
7. Журков С.Н. Физические принципы прогнозирования механического разрушения / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // ДАН СССР, 1981. – 259, №6. – С. 1350-1352.
8. Куксенко В.С. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии / В.С. Куксенко, Н.Г. Томилин, Х.Ф. Махмудов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2007, том 33, вып. 2. – С. 67-69.
9. Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
10. Биленко Л.Ф. Промышленная проверка положения о независимом измельчении компонентов в шаровой мельнице / Л.Ф. Биленко, Ю.И. Орлов, И.М. Костин // Обогащение руд, 1974, № 4. – С. 20 - 22.
11. Борщевский А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий / Борщевский А.А., Ильин А.С. – Альянс, 2014. – 368 с.

12. Зайков, В.И. Эксплуатация горных машин и оборудования / Зайков В.И., Берлявский Г.П. – М.: МГУ, 2006. – 257 с.
13. Ходаков Г. С. Тонкое измельчение строительных материалов / Ходаков Г.С. – 1972. – 239 с.
14. Григорьев В.И. Транспортные машины и комплексы подземных разработок / В.И. Григорьев, В.А. Дьяков, Ю.С. Пухов. – М.: Недра, 1979. – 302 с.

### Summary

**Sidashenko A., Luzan S.O.** Regularities of grinding mixtures of various materials

*Theoretical bases of grinding various-strength components in a mixture are considered. The kinetics of crushing of aluminum and iron oxides has been studied, and also mixtures thereof. A model the process joint grinding fractions of different materials is proposed.*

**Keywords:** grinding, mechanoactivation, components, mixture, fraction, oxide.

### References

1. Molchanov V.I. Aktivacija mineralov pri izmel'chenii / Molchanov V.I., Selezneva O.G., Zhirnov E.N. – Nedra, 1988. – 208 s.
2. Duguev S.V. Tonkoe i sverhtonkoe izmel'chenie tverdyh materialov – put' k nanotehnologii-jam / Duguev S.V., Ivanova V.B. // Stroit. materialy. – 2007. – № 11 (635). – S. 29-31.
3. Lomaeva S.F. Temperaturnaja stabil'nost' Fe<sub>3</sub>C v sistemah, poluchennyh mehanoaktivaciej zheleza v zhidkih organicheskikh sredah / S.F. Lomaeva, N.V. Ivanov, E.P. Elsukov [i dr.] // Zhurn. strukt. himii. 2004. T. 45. – S. 163-171.
4. Fundamental'nye osnovy mehanicheskoy aktivacii, mehanosinteza i mehanohimicheskikh tehnologij / [V.V. Boldyrev, E.G. Avvakumov i dr.]; pod red. E.G. Avvakumov. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2009. – 343 s.
5. Tamuzh V.P. Mikromehanika razrushenija polimernyh materialov / V.P. Tamuzh, V.S. Kuksenko. – Zinatne. Riga. – 1978. – 294 s.
6. Kuksenko V.S. Diagnostika i prognozirovanie razrushenij krupnomasshtabnyh ob#ektov / V.S. Kuksenko // FTT, 2005, tom 47, vyp. 5. – S. 788-794.
7. Zhurkov S.N. Fizicheskie principy prognozirovanija mehanicheskogo razrushenija / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, V.A. Petrov // DAN SSSR, 1981. – 259, №6. – S. 1350-1352.
8. Kuksenko V.S. Prognozirovanie poteri ustojchivosti nagruzhennyh jelementov konstrukcij metodom akusticheskoy jemissii / V.S. Kuksenko, N.G. Tomilin, H.F. Mahmudov [i dr.] // Pis'ma v ZhTF.– 2007, tom 33, vyp. 2. – C. 67-69.
9. Perov V.A. Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh / Perov V.A., Andreev E.E., Bilenko L.F. – М.: Nedra, 1990. – 301 s.
10. Bilenko L.F. Promyshlennaja proverka polozhenija o nezavisimom izmel'chenii komponentov v sharovoj mel'nice / L.F. Bilenko, Ju.I. Orlov, I.M. Kostin // Obogashhenie rud, 1974, № 4. – S. 20 - 22.
11. Borshhevskij A.A. Mehanicheskoe oborudovanie dlja proizvodstva stroitel'nyh materialov i izdelij / Borshhevskij A.A., Il'in A.S. – Al'jans, 2014. – 368 s.
12. Zajkov, V.I. Jekspluatacija gornyh mashin i oborudovanija / Zajkov V.I., Berljavskij G.P. – М.: МГУ, 2006. – 257 s.
13. Hodakov G. S. Tonkoe izmel'chenie stroitel'nyh materialov / Hodakov G.S. – 1972. – 239 s.
14. Grigor'ev V.I. Transportnye mashiny i komplekсы podzemnyh razrabotok / V.I. Grigor'ev, V.A. D'jakov, Ju.S. Puhov. – М.: Nedra, 1979. – 302 s.