

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 658.011.56

В. О. Кондратець, канд. техн. наук, проф.;
М. О. Карчевська, асп.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ КУЛЬОВОГО МЛИНА РУДОЮ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛУ

Подано результати теоретичних досліджень і запропоновано алгоритм ідентифікації завантаження кульового млина рудою за параметрами енергетичної ефективності руйнування матеріалу.

Вступ

Зменшення запасів багатих залізних руд розширює виробництво збагаченої металургійної сировини. Це потребує подрібнення матеріалу з порівняно невисоким вмістом корисного компонента, яке здійснюють здебільшого в кульових млинах. Подрібнення руд в процесах збагачення потребує майже половину енергозатрат від всього виробництва. Крім цього, в процесах збагачення витрачаються значні матеріальні ресурси у вигляді куль і футерівки. Зменшення енергетичних і матеріальних витрат дозволить знизити собівартість металургійної сировини і підвищити конкурентоспроможність кінцевої продукції стратегічної в Україні галузі. Вирішення цієї проблеми спрямовано на реалізацію Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі», затвердженої законом України «Про основи державної політики у сфері науки і науково-технічної діяльності», по напрямку 5.3.1 «Розробка технологій видобутку та збагачення сировинних матеріалів для металургійного виробництва, в тому числі з використанням відходів виробництва». Частиною задачею цього напрямку є виконання науково-дослідної роботи «Комп'ютеризована система ідентифікації завантаження кульового млина при управлінні подрібненням руди» (0109U007939), яка є складовою частиною тематичного плану Кіровоградського національного технічного університету.

Найбільш напружено працюють кульові млини першої стадії подрібнення, у яких основним експлуатаційним параметром є завантаження рудою. Перезавантаження млина рудою призводить до аварійного режиму, а недоавантаження — до великих економічних збитків через перевитрати електроенергії, футерівки, куль, недоотримання готового продукту та збільшення затрат на профілактичне обслуговування. Задача автоматичного завантаження кульового млина рудою, яке позбавляє вказаних недоліків, є складовою розглянутої проблеми. Оптимальну продуктивність подрібнювального агрегату, з якою забезпечується найбільший вихід готового продукту, можна отримати лише у разі повного завантаження кульового млина і певному співвідношенні руда/вода [1]. Однак підтримувати оптимальне завантаження кульового млина рудою неможливо, оскільки відсутні сучасні засоби ідентифікації параметра, а відомі, основані на непрямих методах вимірювання, не відповідають вимогам технологічного процесу [2]. Як показано в роботі [2], слід здійснювати пошук і обґрунтування параметрів, що піддаються автоматичному контролю, які безпосередньо характеризують енергетичну ефективність процесу руйнування матеріалу в барабані млина. Зважаючи на сказане, тема статті є актуальною.

Метою роботи є теоретичне дослідження і розробка підходу до ідентифікації завантаження кульового млина рудою за параметрами енергетичної ефективності руйнування матеріалу.

Розв'язання задачі

Створені технічні засоби нині дозволяють автоматично підтримувати необхідне в конкретних технологічних умовах співвідношення руда/вода, що стабілізує рух пульпи в кульовому млині та взаємодію молотильних тіл з крупними частинками твердого. Під час переміщення руди вздовж ба-

рабана кульового млина крупність частинок твердого поступово зменшується і буде характерною для його певного поперечного перерізу. Якщо завантаження технологічного агрегату змінювати, буде змінюватися і концентрація крупних частинок у пульпі в певному перерізі барабана. В роботі [3] показано, що концентрація крупних частинок твердого в пульпі кульового млина може бути мірою його завантаження рудою. Кульові млини працюють в умовах неперервної зміни стану куль і футерівки, однак можна створити умови автоматичної стабілізації усталеного режиму найкращого кульового навантаження як за об'ємом, так і за складом. В межах $1/3 \dots 1/2$ довжини барабана від завантаження утворюються широкі зони з практично незмінним розміром куль і осередненим розміром шматків руди [4]. У кожному поперечному перерізі млина молольні тіла наближено однакового розміру розшаровуються і у зовнішньому шарі розташовуються найбільш дрібні кулі практично однакового розміру. Кулі більших діаметрів, що дозавантажуються, рухаючись від завантажувальної до розвантажувальної горловини млина, у зовнішній шар не потрапляють [5]. Молольні тіла у зовнішньому шарі у водопадному режимі роботи кульового млина рухаються по траєкторіям, що відповідають двофазному циклу — дуга кола, парабола і мають незмінну швидкість у разі співударяння з футерівкою [6]. Однак нині встановлено [7], що переважна більшість промислових млинів працює у змішаному режимі. При цьому молольні тіла у зовнішньому шарі рухаються по траєкторіям, що відповідають трифазному циклу — колу, параболі та прямій до стінки барабана. У разі переміщення куль по прямій на поверхні п'яти після удару по футерівці буде відчуватися ефективно руйнування частинок руди, зважаючи на те, що молольні тіла діють на зерна подрібнюваного матеріалу з зусиллям, яке у кілька разів перевищує оптимальне значення, зумовлене їх міцнісними характеристиками. Не дивлячись на те, що швидкість руху куль зовнішнього шару після удару по футерівці змінюється під впливом значної кількості факторів, у певних умовах роботи кульового млина ця величина буде незмінною. Пульпа в процесі обертання барабана здійснює складні рухи, осереднюючи склад. Кульовий млин ідеально осереднює матеріал і пульпа має рівномірно розподілені частинки твердого різних розмірів у її об'ємі [5]. Визначаючи параметри енергетичної ефективності руйнування частинок твердого в момент співударяння кулі та футерівки, можна оцінити завантаження кульового млина рудою. Мірою завантаження кульового млина рудою буде виступати об'єм зруйнованого твердого.

Для визначення параметрів енергетичної ефективності руйнування твердого у футерівці радіально встановлено пружний циліндричний стрижень, який буде слугувати первинним перетворювачем. Кінетична енергія $\frac{m_k v_k^2}{2}$ рухомої кулі масою m_k і швидкістю v_k витрачається на виконання роботи руйнування шматка руди на внутрішньому торці стрижня та на деформацію стиснення стрижневого первинного перетворювача. На деформацію стиснення стрижневого первинного перетворювача витрачається кінетична енергія рухомої кулі, зменшена на величину $A_d = k k_1 V_p$, де k — коефіцієнт пропорційності, що залежить від міцності руди; k_1 — стала, що характеризує зв'язок загального і об'єму шматка руди, що деформується; V_p — об'єм шматка руди. Швидкість кулі після деформації стиснення стрижневого первинного перетворювача дорівнює нулю. Тому робота на деформування стисненням дорівнює

$$A_{dc} = \frac{F_1}{2} f_1, \quad (1)$$

де F_1 — сила, що розвивається у разі стиснення стрижневого перетворювача; f_1 — повне укорочення стрижня під дією сили F_1 .

Враховуючи, що зміна кінетичної енергії рухомої кулі дорівнює виконаній при цьому роботі, можна записати рівняння

$$\frac{m_k v_k^2}{2} = k k_1 V_p + \frac{F_1}{2} f_1. \quad (2)$$

У рівнянні (2) сила F_1 однозначно зв'язана з повним укороченням стрижня f_1 залежністю

$$F_1 = \frac{E_1 S_1}{l_{01}} f_1, \quad (3)$$

де f_1 — повне укорочення стрижня під дією сили F_1 ; E_1 — модуль Юнга; S_1 , l_{01} — відповідно,

площа та довжина стержня.

Підставимо F_1 з рівняння (3) в (2) і отримаємо:

$$\frac{m_k v_k^2}{2} = k k_1 V_p + \frac{E_1 S_1}{2 l_{01}} f_1^2. \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що з незмінними $E_1, S_1, l_{01}, k, k_1, m_k$ і v_k за повним укороченням стержневого первинного перетворювача f_1 можна оцінити об'єм шматків руди, що знаходяться на його внутрішньому торці. У рівнянні (4) E_1, S_1 і l_{01} — конструктивні сталі перетворювача, k і k_1 — залежать від властивостей руди і можуть бути враховані. Маса куль m_k , як було показано раніше, в окремому поперечному розрізі барабана кульового млина практично не змінюється. Швидкість куль v_k в режимі трифазного циклу руху буде змінюватись в значних межах зі зміною умов роботи кульового млина. Враховуючи, що швидкість куль, крім того, у рівняння входить у квадраті, слід очікувати значних похибок у визначенні об'єму руди V_p .

Підвищити точність визначення об'єму руди V_p на внутрішньому торці стрижневого перетворювача можна, вилучивши із залежності змінний параметр v_k^2 . Введемо допоміжний стрижневий первинний перетворювач, на внутрішній торець якого не потрапляють крупні шматки руди, що підлягають руйнуванню (рис. 1). Для такого первинного перетворювача характерним буде те, що вся кінетична енергія рухомої кулі перетвориться в роботу на деформацію стиснення. При цьому справедливою буде рівність

$$\frac{m_k v_k^2}{2} = \frac{F_2}{2} f_2, \quad (5)$$

де F_2 — сила, яка розвивається у разі стиснення додаткового стрижневого перетворювача; f_2 — повне укорочення додаткового первинного перетворювача під дією сили F_2 .

У загальному випадку додатковий перетворювач буде мати інші конструктивні параметри. Тому, використавши залежність (3), запишемо

$$m_k v_k^2 = \frac{E_2 S_2}{l_{02}} f_2^2. \quad (6)$$

Враховуючи, що в конкретних умовах роботи кульового млина швидкості руху куль є незмінними, прирівняємо праві частини рівнянь (4) і (6)

$$\frac{E_2 S_2}{l_{02}} f_2^2 = 2 k k_1 V_p + \frac{E_1 S_1}{l_{01}} f_1^2, \quad (7)$$

звідки

$$V_p = \frac{1}{2 k k_1} \left(\frac{E_2 S_2}{l_{02}} f_2^2 - \frac{E_1 S_1}{l_{01}} f_1^2 \right). \quad (8)$$

Виконаємо основний і додатковий перетворювач з однакового матеріалу і однакової довжини, але різних площ поперечного перерізу. Тоді $E_1 = E_2 = E, l_{01} = l_{02} = l_0$. З урахуванням цього рівняння (8) набуде вигляду

$$V_p = \frac{E}{2 k k_1 l_0} (S_2 f_2^2 - S_1 f_1^2). \quad (9)$$

Із залежності (9) випливає, що об'єм крупних шматків руди на внутрішньому торці стрижня можна визначати за повним укороченням основного і допоміжного стрижневих первинних перетворювачів, причому зміна швидкості руху куль на даний процес не впливає. Значення коефіцієнтів k і k_1 залежать від типу руди, що переробляється. Останні параметри є конструктивними сталими і на точність визначення об'єму руди не впливають. Як показав аналіз, чутливість стрижневих первинних перетворювачів в основному визначається особливостями цього процесу і практично на неї впливає

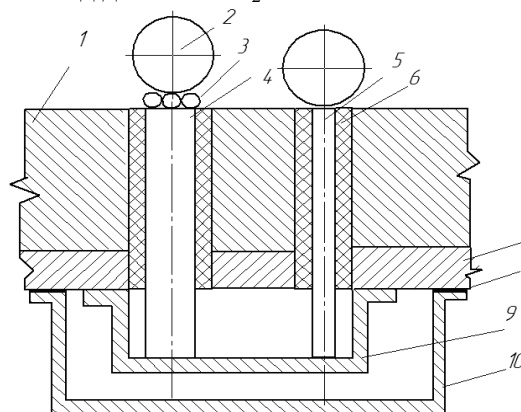


Рис. 1. Схематичне зображення двостержневого пристрою ідентифікації завантаження кульового млина рудою: 1 — футерівка; 2 — куля; 3 — крупні шматки руди; 4 — основний стрижневий перетворювач; 5 — допоміжний стрижневий перетворювач; 6 — гідроізоляційне та амортизаційне кріплення; 7 — фрагмент барабана млина; 8 — прокладка; 9 — підпора; 10 — кришка

ти не має можливості.

Визначати об'єм крупних шматків руди в робочому просторі перетворювача за повним укороченням довжини f_1 і f_2 із залежності (9) не має можливості, оскільки ці параметри знаходяться поза доступом. Параметри деформації стиснення стрижнів можна виміряти на їх кінцевій ділянці на певній відстані x від точки закріплення. Ділянку вимірювання параметра можна подати як частку всієї довжини перетворювача, тобто $x = k_2 l_0$, де k_2 теоретично може приймати значення в межах $0 \dots 1$. Припустимо ділянку вимірювання параметрів обох перетворювачів однаковою. Враховуючи пропорційність деформацій по довжині перетворювачів з певними силами, укорочення частин стрижнів у площинах вимірювання набудуть значень

$$f_{11} = f_1 \frac{x}{l_0}; \tag{10}$$

$$f_{21} = f_2 \frac{x}{l_0}. \tag{11}$$

Визначимо повні укорочення стрижнів в процесі вимірювання із залежностей (10) і (11). Вони складуть

$$f_1 = \frac{l_0}{x} f_{11} = \frac{1}{k_2} f_{11}; \tag{12}$$

$$f_2 = \frac{l_0}{x} f_{21} = \frac{1}{k_2} f_{21}. \tag{13}$$

Підставивши знайдені значення f_1 і f_2 у залежність (9), отримаємо:

$$V_p = \frac{E}{2kk_1k_2^2l_0} (S_2f_{21}^2 - S_1f_{11}^2). \tag{14}$$

Знайдена залежність (14) є математичною моделлю завантаження рудою кульового млина, за якою можна ідентифікувати цей технологічний параметр в процесі роботи. В математичну модель входять конструктивні константи перетворювачів та змінні константи, що характеризують тип руди, яка переробляється. Математична модель не містить параметрів, які відрізняються нестабільністю, тому гарантує високу точність визначення завантаження кульового млина рудою.

Залежність (14) відповідає трифазному циклу руху молотильних тіл. У випадку двофазного циклу руху куль допоміжний перетворювач встановлювати не потрібно. При цьому слід враховувати кінетичну енергію рухомої з незмінною швидкістю кулі і використовувати залежність (4).

В результаті математичного моделювання отримана статична характеристика перетворювача (рис. 2). Для відомих типів руд (коефіцієнтів k) характеристика є прямою 1, що не залежить від міцнісних властивостей матеріалу. В границях одного родовища міцність руди не змінюється в широких межах, тому можна орієнтуватися на самий розповсюджений тип корисних копалин, наприклад, з середнім значенням міцності. Тоді за залежністю (14) будемо мати сім'ю характеристик, отриманих, відповідно, для $k = 77 \cdot 10^4$, $k = 84 \cdot 10^4$ і $k = 70 \cdot 10^4$ кг/м·сек² (рис. 2, криві 2, 3, 4). Тобто, в процесі ідентифікації будемо отримувати похибку, однак на практиці ця похибка буде джерелом інформації, оскільки для міцнішої руди необхідно зменшити завантаження, а для менш міцної — збільшити, що впливає з рис. 2.

Експериментальна перевірка підтвердила правильність підходу. Експерименти, як і ма-

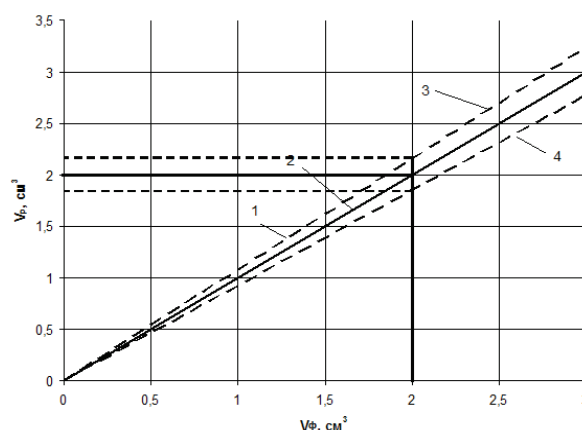


Рис. 2. Залежність визначеного об'єму крупних частинок руди на торці первинного перетворювача від його фактичного значення у разі: 1 — налагодження вимірювача на конкретний тип руди; 2, 3, 4 — налагодження перетворювача на руду середньої міцності

тематичне моделювання, проводилися на сталевих первинних перетворювачах діаметром 30 мм, 15 мм з кулями діаметром 50 мм, які падали з висоти 2 м. В якості вторинних використовувалися тензоперетворювачі з константану з базою 20 мм, шириною 9 мм і опором 200 Ом. На кожному первинному перетворювачі встановлювалося по чотири тензоперетворювачі. Математична модель завантаження кульового млина рудою при цьому має вигляд

$$V_p = \frac{El_T^2}{2kk_1k_2^2l_0k_T^2R_T^2} (S_2\Delta R_2^2 - S_1\Delta R_1^2), \quad (15)$$

де l_T , R_T , k_T — відповідно, база, опір і коефіцієнт тензочутливості перетворювача; ΔR_1 , ΔR_2 — відповідно, прирощення опору основного та допоміжного перетворювачів.

Отримані залежності співпадали з характеристиками, показаними на рис. 2.

Висновки

Описаний підхід до ідентифікації завантаження кульового млина рудою захищено патентом [8].

Отже, завантаження кульового млина рудою можна визначити прямим вимірюванням параметрів енергетичної ефективності руйнування твердого в пульпі, а саме, — укорочень частин основного і допоміжного стрижневих пружних перетворювачів. Мірою завантаження кульового млина рудою є об'єм зруйнованих крупних частинок твердого на торці основного первинного перетворювача в процесі взаємодії його з рухомою кулею зовнішнього шару.

Перспективою подальших досліджень є розробка ефективного вторинного перетворювача та вимірювальної схеми пристрою з передачею інформації з обертового об'єкта на нерухомий.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бонч-Бруевич А. М. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем / А. М. Бонч-Бруевич, В. Л. Быков, П. И. Чинаев. — М. : Машиностроение, 1967. — 292 с.
2. Измельчение. Энергетика и технология : учеб. пос. для вузов / [Г. Г. Пивняк, Л. А. Вайсберг, В. И. Кириченко и др.]. — М. : изд. дом «Руда и металлы», 2007. — 296 с.
3. Кондратец В. О. Моделювання розподілу крупного твердого з метою ідентифікації завантаження кульових млинів / В. О. Кондратец, М. О. Карчевська // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту : матеріали міжнар. наук. конф., 18—22 травня 2009 р., Євпаторія. — Т. 1. — Херсон : ХНТУ, 2009. — С. 68—70.
4. Кондратец В. О. Теоретичне дослідження усталених і перехідних режимів роботи куль та футерівки в млинах / В. О. Кондратец, О. М. Рева, М. О. Карчевська // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць КНТУ. — 2008. — № 21. — С. 187—196.
5. Кондратец В. О. Дослідження руху молоткових тіл і пульпи в барабані кульового млина з метою ідентифікації завантаження / В. О. Кондратец, М. О. Карчевська // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць КНТУ. — 2009. — № 22. — С. 29—35.
6. Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — М. : Недра, 1966. — 396 с.
7. Маляров П. В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки : моног. / П. В. Маляров — Ростов-на-Дону : ООО «Ростиздат», 2004. — 320 с.
8. Патент на корисну модель 45414 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб ідентифікації завантаження кульового млина рудою / В. О. Кондратец, М. О. Карчевська (Україна); заявник та патентовласник Кіровоградський нац. техн. ун-т. — № u 200905505; заявл. 01.05.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування

Стаття надійшла до редакції 11.02.11

Рекомендована до друку 10.03.11

Кондратец Василь Олександрович — професор, **Карчевська Марина Олександрівна** — аспірантка.
Кафедра автоматизації виробничих процесів, Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград