

УДК 622.23:05459

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.138>

ДЕЯКІ ПИТАННЯ РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПОДРІБНЕННІ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ У БАРАБАННИХ КУЛЬОВИХ МЛИНАХ

¹Калганков Є.В.¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ В БАРАБАННОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

¹Калганков Е.В.¹Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет

SOME ISSUES OF RESOURCE AND ENERGY SAVING IN CRUSHING OF MINERAL RAW MATERIALS IN DRUM BALL MILLS

¹Kalhankov Ye.V.¹Dnipro State Agrarian and Economic University

Анотація. В статті проведено аналітичні дослідження процесу дезінтеграції мінеральної сировини в кульових барабанних млинах першої, другої та третьої стадій подрібнення. Встановлено, що процес подрібнення мінеральної сировини найбільш енергоємний і ресурсовитратний. Для поліпшення технологічних і економічних показників процесів подрібнення в барабанних млинах використовують різні прийоми. Такі як збільшення об'єму млинів, видозміна профілю футеровки (конструкції) і застосування більш зносостійких матеріалів, завантаження в млини самоподрібнення куль і ін. З метою зниження тонажу помолу збільшують число стадій подрібнення, або змінюють величину й напрямок циркулюючих навантажень. Однак відчутних ефектів усі ці прийоми поки не забезпечують.

Дослідження процесу подрібнення вказують, що міцність гірської породи на стиск в 5-10 разів вище межі міцності на зрушення й в 8-15 раз вище межі міцності на розтягання, при руйнуванні породи стиском енергоємність в 17,4 рази більше, чим при руйнуванні зсувними або розтягувальними напруженнями. Таким чином, найбільш енергозберігаючим механізмом руйнування мінеральної сировини є способи й засоби, у яких реалізуються переважно зсувні напруження і це можливо реалізувати введенням в конструкцію млина пружних ланок, замінити металеву футеровку на гумову певної форми. в роботі досліджено енерговитрати та розроблено концепцію їх скорочення, так запропоновано використовувати гумову футеровку з хвильовою геометрією поверхні. З такою геометричною поверхнею футеровка вступає у гармонічну взаємодію з завантаженням та в перші години роботи виводить млин на заданий режим роботи.

Наведено також дослідження використання гумової футеровки, яка у порівнянні з металеву дає змогу: знизити масу комплексу футеровки більш ніж в 3-5 раз і тим самим підвищити термін служби опорних підшипників, знизити експлуатаційні витрати на монтажні-демонтажні роботи із заміни зношеної футеровки; в 2-3 рази знизити шум; на 3-5 %; забезпечити задану продуктивність млина вже з перших годин роботи; знизити витрату мелючих тіл, на 6-10 %; зменшити споживання електроенергії на 7-9 % (у цілому на технологічну секцію на 10-12 %); підвищити термін служби на 80-150 %; підвищити тривалість міжремонтних циклів у два рази; на 3-5 % підвищити коефіцієнт використання млинів; збільшити приріст готового класу продукту (-0,056 мм) на 17-29 %.

Ключові слова: дезінтеграція, металева футеровка, гумова футеровка, кульові млини, хвильове зношування, ресурсо- і енергозберігаюча технологія

Проблема і її зв'язок з науковими й практичними завданнями. Подальша інтенсифікація робіт у сучасній промисловості зажадала створення нових технологій, що, у свою чергу, привело до модернізації машинобудівної продукції й до створення принципово нових машин.

Суттєво підвищилися вимоги до енерго- і металоемності машин, до їхньої надійності й довговічності, до екологічної чистоти. З іншого боку, намітилася тенденція до інтенсифікації режимів роботи машин, що привело до збільшення напруженості, зношуванню, шкідливим коливанням і т.і. Причому, мова йшла не про одиничні машини, а про комплекс машин у різних галузях промисловості:

сільськогосподарської, гірської, металургійної, хімічної, будівельної, автомобільної тощо.

З урахуванням технології робіт у різних областях техніки ці завдання вирішувалися різними методами: створенням принципово нових конструкцій машин, використанням нових конструкційних матеріалів, зміною технології тощо. Однак, незмінною для всієї машинобудівної промисловості була концепція – введення в структурну схему машин пружних ланок (віброізоляторів, компенсаторів складання, зносостійких покриттів і футеровок, пружних прокладок, демпферів і ін.) з еластомерів – гум і поліуретанів.

Еластомери виявилися унікальним конструкційним матеріалом, який у ряді випадків – шини, вібро- і сейсмоопори, пружні зв'язки, захисні футеровки й покриття машин, вироби медицини, прокладки й ін. – неможливо замінити жодним з існуючих матеріалів.

Еластомерні конструкції дозволяють: підвищити в 2-3 рази продуктивність машин за рахунок інтенсифікації режиму; знизити (до 50 %) металоємність; в 2-10 разів підвищити довговічність і надійність; знизити вібро- і сеймонапруженість машин і споруджень; створити принципово нові конструкції машин [1].

Девіз сучасного машинобудування: кількість гуми, що споживається галуззю, свідчить про ступінь розвитку галузі; сучасні конструкції машин здатні задовольняти технологічним вимогам (приблизно до 2030 року), якщо підвищити їх довговічність і надійність.

Особливо перспективне використання гуми в техніці збагачення мінеральної сировини й, насамперед, у якості захисних футеровок барабанних млинів: кульових і самоподрібнення. Останнім часом такі млини працюють в екстремальних умовах експлуатації: діаметр млинів самоподрібнення досягає 18 м (мідні рудники Чилі), а в кульових млинах з гумовою й гумометалевою футеровкою кулі діаметром до 125 мм [1, 2].

Починаючи із середини минулого століття, гума зайняла міцне місце як матеріал для виготовлення захисних футеровок, у багатьох випадках витісняючи кращі сорти сталі. Цьому сприяє її висока втомна міцність, зносостійкість, технологічність виготовлення, простота монтажно-демонтажних робіт, порівняно низька вартість і т.д. Однак дотепер серед технологів немає єдиної думки відносно позитивного впливу гуми на технологічний процес подрібнення матеріалів.

Аналіз досліджень і публікацій. Основними роботами в області дослідження та конструювання гумових футеровок можна виділити роботи Лавендела, Девіса, Шалламаха, Мура, Є.Ф. Чижика, В.Н. Потураєва, В.І. Дирди, В.П. Надутого, П.В. Малярова та інших. Але більшість робіт присвячена розробці зносостійкої конструкції футеровки й майже не розглядається її вплив на технологічний процес дезінтеграції мінеральної сировини.

У роботі [3] при розгляді різних конструкцій футеровок, зауважено, що форма футеровки може впливати на енергоспоживання млина, а отже й на технологічний процес подрібнення сировини.

Реальні дослідження впливу конструкції та форми профілю гумової футеровки на технологічний процес дезінтеграції наведено в роботі [4] де автори на базі ТОВ «ПівГЗК» провели порівняльні випробування гумової та металевий

футеровок на 2 та 3 стадіях подрібнення. У результаті випробувань встановили, що гумова футеровка не тільки є більш довговічною, а ще й позитивно впливає на процес подрібнення сировини.

Також встановлено, що процес подрібнення в барабанних млинах досить енергоємний; так за даними різних авторів і гірничо-збагачувальних комбінатів на процес рудопідготовки витрачається до 60 % енергії від всього процесу збагачення руди [4, 5], а за даними [6] близько 10 % усієї енергії, що виробляється у світі витрачається саме на рудопідготовку. Тому процесам енерго- та ресурсозбереження при подрібненні руди необхідно приділяти багато уваги.

Тому питання використання та конструювання гумової футеровки є актуальним, особливо це стосується першої стадії подрібнення де процес подрібнення є найбільш енергоємним.

Мета. Дослідження процесу дезінтеграції мінеральної сировини та розробка концепції ресурсо і енергозбереження в процесі подрібнення в барабанних кульових млинах.

Деякі проблеми енергозбереження при подрібненні руди в кульових млинах. У міру збільшення глибини видобутку, міцності, і збідніння руд питання зниження енергоємності руйнування при їх дробленні й подрібненню отримують особливу актуальність у таких витратних галузях, як гірничо-металургійна промисловість. Це пов'язане, насамперед, із широким використанням традиційних технологій руйнування гірських порід, які за останні приблизно сто років у змісті енергозбереження змінилися незначно.

В інженерній практиці найбільш характерним і універсальним інформаційним параметром, що визначають опір руди подрібненню, є ефективність подрібнення, яка визначається як кількість енергії, витраченої на одну тону кондиційного продукту (наприклад, концентрату):

$$e_{ef} = \frac{U_e}{Q(\beta_k - \beta_{вих})}, \quad (1)$$

де U_e – кількість енергії, витраченої в одиницю часу, кВт·г;

Q – кількість руди, подрібненої за проміжок часу, т;

$\beta_k, \beta_{вих}$ – вміст заданого класу крупності відповідно в подрібненому продукті й у вихідній руді, %.

У випадку постійного складу руди, що переробляється, мінімальне значення e_{ef} буде свідчити про роботу млина в оптимальному режимі по параметрах завантаження й продуктивності.

Для поліпшення технологічних і економічних показників процесів подрібнення в барабанних млинах використовують різні прийоми. Такі як збільшення об'єму млинів, видозміна профілю футеровки (конструкції) і застосування більш зносостійких матеріалів, завантаження в млини самоподрібнення куль і ін.

З метою зниження тонажу помолу збільшують число стадій подрібнення, або змінюють величину й напрямок циркулюючих навантажень. Однак відчутних ефектів усі ці прийоми поки не забезпечують.

Одним з найбільш надійних шляхів вирішення проблеми збільшення продуктивності по живленню головних млинів і приросту по готовому класу в млинах

1-ї і наступних стадій подрібнення, при одночасному зниженні експлуатаційних витрат, є механізм створення зсувних напружень на основі використання гумових футеровок хвильового профілю (для млинів усіх стадій подрібнення), з насиченою робочою поверхнею, спеціальними металевими елементами – шипами (тільки для млинів 1-ї стадії подрібнення).

Розглянемо енергетичну складову процесів дроблення й подрібнення гірських порід.

Як відзначалося вище, багато дослідників сходяться в думці, що при одній і тій же ступені подрібнення незалежно від способу руйнування енергія руйнування для однієї й тієї ж породи залишається постійною. Для ідеально пружної породи питома робота руйнування U_0 визначається як

$$U_0 = \frac{\sigma_{cm}^2}{2E}, \quad (2)$$

де σ_{cm} – напруження при стиску зразка породи;

E – модуль пружності породи.

При грузлих або пластичних складових руйнування відбуваються додаткові витрати енергії.

Це питання розглядається в роботах Кулона, Навьє, Мору, Гриффітса, Орована, Черепанова й інших.

У свою чергу Кулон запропонував теорію максимального дотичного напруження. Згідно із цією теорією зразок зруйнується, коли максимальне дотичне напруження в деякому мікрооб'ємі матеріалу досягне граничної величини S_0 . Ця величина S_0 звичайно називається міцністю матеріалу при зрушенні. Якщо головні нормальні напруження в зразку $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то максимальне дотичне напруження буде

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3).$$

І критерій руйнування Кулона можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \geq S_0.$$

Навьє трохи модифікував теорію Кулона. Розглянемо двовимірний випадок, коли нормальні напруження σ_θ і дотичні напруження τ_θ діють у площині руйнування зразка гірської породи. Цей випадок досить характерний для процесу руйнування залізних руд у кульових млинах.

Згідно з теорією Кулона-Навьє руйнування зразка гірської породи відбудеться в тому випадку, коли дотичне напруження, що діє в площині руйнування, досягне величини

$$|\tau_\theta| = S_0 + \mu\sigma_\theta, \quad (3)$$

або

$$S_0 = |\tau_\theta| - \mu\sigma_\theta, \quad (4)$$

де $|\tau_\theta|$ – абсолютне значення дотичного напруження;

$\mu\sigma_\theta$ – вираз, тотожний силі тертя на похилій площині з кутом θ ;

S_0 – міцність матеріалу при зрушенні;

μ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

σ_θ – нормальне напруження на похилій площині з кутом θ .

У термінах нормального й дотичного напружень критерій міцності Кулона-Нав'є може бути записаний у вигляді:

$$\sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)2 \cos 2\theta}{2 + (\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (5)$$

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta. \quad (6)$$

Звідси

$$S_0 = |\tau_{\theta}| - \mu \sigma_{\theta} = -\frac{\rho}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\theta - \mu \cos 2\theta). \quad (7)$$

При одноосьовому стиску ($\sigma_1 = 3_0$, $\sigma_3 = 0$) критерій Кулона-Нав'є можна записати в такий спосіб

$$C_0 = \frac{2S_0}{(\mu^2 + 1)^{0,5} - \mu}, \quad (8)$$

або

$$S_0 = \frac{1}{2}C_0 [(\mu^2 + 1)^{0,5} - \mu], \quad (9)$$

де 3_0 – міцність матеріалу при стиску.

Порівнюючи вирази (7) і (8) можна відзначити, що при $\mu = 1$ (номінальне значення коефіцієнта внутрішнього тертя) міцність гірської породи на стиск завжди більше міцності при зрушенні, тобто $3_0 > S_0$. Це один з досить важливих висновків теорії міцності Кулона-Нав'є, який підтверджується експериментально. Для гірських порід при різних видах навантаження експериментально доведено, що

$$\sigma_p < \tau_{\theta} < \sigma_{cm}.$$

При цьому міцність гірської породи на стиск в 5-10 разів вище межі міцності на зрушення й в 8-15 раз вище межі міцності на розтягання.

Така ж закономірність спостерігається й при розгляді енергоємності руйнування гірської породи: при руйнуванні породи стиском енергоємність в 10-20 разів (на думку авторів роботи [7] – в 40-90 разів) більше, чим при руйнуванні зсувними або розтягувальними напруженнями.

Розглянемо приклад визначення енергоємності при руйнуванні залізної руди з наступними механічними характеристиками, отриманими при експериментальних дослідженнях стандартних зразків магнетитових руд: модуль Юнга $E = 5,2 \cdot 10^5$ кгс/см², модуль зрушення $G = 2,2 \cdot 10^5$ кгс/см², міцність при стиску $\sigma_{cm} = 398$ кгс/см², міцність при зрушенні $\sigma_{зр} = 62$ кгс/см².

Використовуючи вираз (2), одержимо:

$$\frac{U_{cm}}{U_{зр}} = 17,4.$$

Як видно, енергоємність при руйнуванні зразків залізної руди при деформаціях стиску в 17,4 рази більше, чим при руйнуванні зсувними напруженнями.

Таким чином, найбільш енергозберігаючим механізмом руйнування мінеральної сировини є способи й засоби, у яких реалізуються переважно зсувні напруження (розтягувальні напруження важко реалізувати).

Створена раніше нами, хвильова теорія абразивно-втомного зношування гумових футеровок [8], методи їх розрахунків і методи укладання елементів у барабані дозволили механікам і технологам створити футеровки типу «Хвиля» (на ринку послуг «Плита-Хвиля», «Плита-Ліфтер-Хвиля», «G.M-хвиля» і «Плита-Н-Хвиля» рис. 1, рис. 2).

Згідно із хвильовою теорією зношування, для поліпшення технології подрібнення й збільшення довговічності футеровки необхідно, щоб у барабані млина встановилася така взаємодія завантаження й елементів футеровки, при якому витрачається мінімум енергії й дотримується принцип мінімуму виробництва ентропії, тобто мінімуму безладдя в системі. Така гармонійна взаємодія досягається завдяки використанню нових оригінальних конструкцій футеровок типу «Хвиля». Крім цього, такі футеровки завдяки своїм морфометричним параметрам при руйнуванні руди дозволяють реалізувати переважно зсувні напруження, що дозволяє значно знизити енерговитрати на дезінтеграцію мінеральної сировини, а також збільшити приріст готового класу (-0,056 мм).

У процесі експлуатації елементи футеровок отримують хвильову поверхню (рис. 3), яка зберігається практично до відмови [8].

Футеровки «Хвиля» забезпечують: задану продуктивність із перших годин роботи млина; збереження хвильового рельєфу до повного зношування (рис. 3 в,г), що забезпечує стабільні технологічні показники в плинні всього строку експлуатації; поліпшення технологічних показників роботи млинів на всіх стадіях подрібнення; термін служби, наприклад, для кульових млинів другої й третьої стадії подрібнення на ГЗК Кривого Рогу становить понад 32-36 тис. годин без заміни елементів футеровки, що стало передумовою до створення ресурсо – і енергозберігаючої технології дезінтеграції руди.

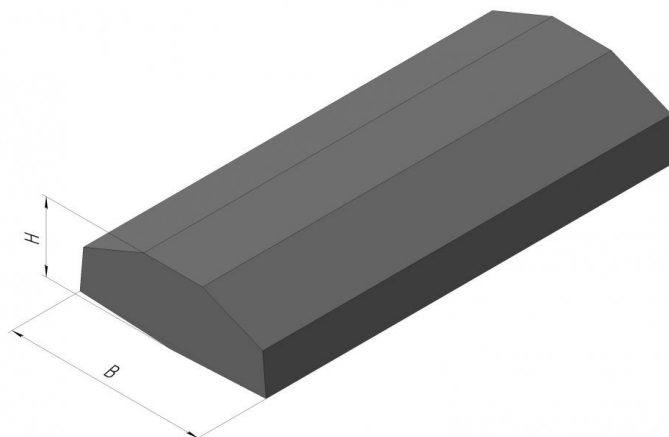


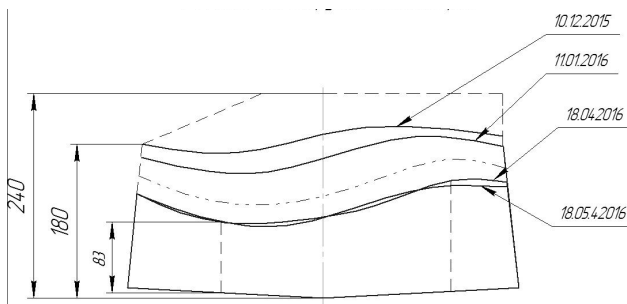
Рисунок 1 – Загальний вид гладкої трапецієподібної плити



Рисунок 2 – Гумова футеровка «G.M-Хвиля»; ПівГЗК, млин (3,6 м, перша стадія подрібнення, кулі $\varnothing 100$ мм, $t = 6,5$ міс.)



а – хвилювий знос футеровочних плит млина під час проміжного огляду;



б – динаміка зносу футеровочних плит;



в – переріз демонтованої футеровочної плити яка працювала з кулями $\varnothing 60$ мм;



г – переріз демонтованої футеровочної плити яка працювала з кулями $\varnothing 100$ мм

Рисунок 3 – Хвилювий характер зносу гумової футеровки млина МШР 3,0×4,0

Одним зі способів розв'язку проблеми енергозбереження в кульових млинах (безумовно, поряд з удосконалюванням технологічних схем) є створення нової технології подрібнення руди, при якій мінімізація енерговитрат досягається за рахунок такої взаємодії завантаження й елементів футеровки, при якому затрачується мінімум енергії (принцип Релея – Гельмгольца) і дотримується принцип мінімуму виробництва ентропії (принцип Пригожина). Така гармонійна взаємодія досягається завдяки використанню нових оригінальних конструкцій гумових футеровок, відомих у практиці як «Плита – Хвиля», «Г.М – Хвиля» і «Плита – Ліфтер – Хвиля».

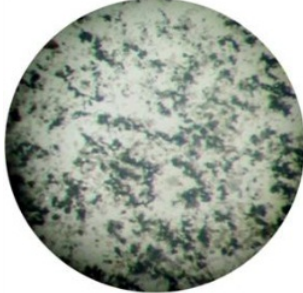
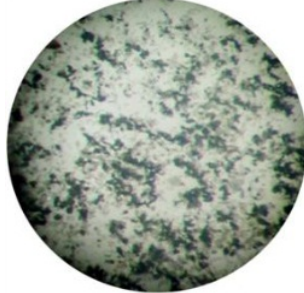
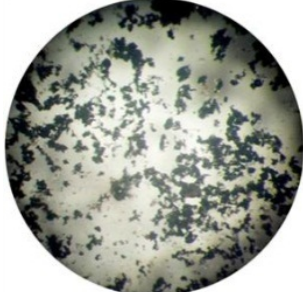
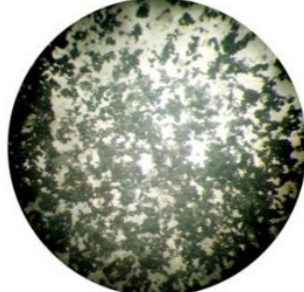
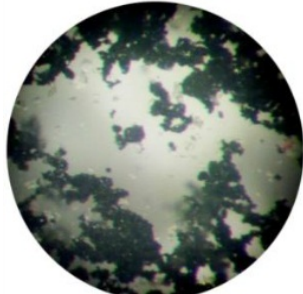
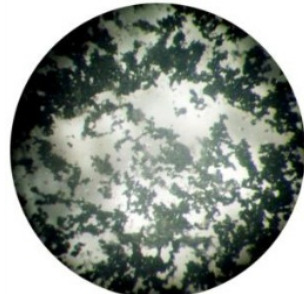
У великих млинах самоподрібнення типу ММС-10,5/5,6 і на кульових млинах другої й третьої стадії подрібнення гумова футеровка виявилася більш ефективною й довговічною, чим металева [1-4].

В останні роки гумометалева футеровка стали використовувати й на млинах першої стадії подрібнення. Так, наприклад, на ПівГЗК (м. Кривий Ріг, Україна) при подрібненні міцних залізних руд на кульовому млині діаметром 3,6 м з кулями діаметром 100 мм гумометалева футеровка «Г.М-Хвиля» (виготовлювач ТОВ «НПП Валса ГТВ») показала досить гарні результати як за технологічними показниками, довговічності й надійності (відсутності раптових відмов), так і по низьких експлуатаційних витратах монтажних-демонтажних робіт: знизилася витрата електроенергії; на 5 % знизилася питома витрата куль; приріст готового класу продукту збільшився на – 10-12 %.

Світовий досвід свідчить: на сьогоднішній день гумові футеровки завдяки своїм унікальним властивостям – високій довговічності й надійності, великій дисипації енергії гуми, високою зносостійкістю і т.д. – мають явну перевагу перед металевими. Серед конструкцій гумових футеровок на ринку послуг України найбільш затребуваними є футеровки виробництва ТОВ «НПП Валса ГТВ» (г. Біла Церква, Україна) – «Плита – Хвиля», «Г.М.-Хвиля», «Плита – Ліфтер» і інші [9, 10].

Завдяки своїм морфометричним параметрам такі футеровки при руйнуванні мінеральної сировини, особливо на стику «завантаження – футеровка», дозволяють реалізувати переважно зсувні напруження. Так при використанні гумової футеровки в змиві млинів збільшилася кількість часток класу $-0,044$ мм і поліпшувалося розкриття зерен, про що свідчать мінералогічні дослідження, проведені за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-8 (табл. 1).

Таблиця 1 – Матеріал злива млина з використанням металевої та гумової футеровок

Стадія подрібнення	Клас крупності, мм	Кратність збільшення	Матеріал футеровки	
			Металева	Гумова
1	-0,044	x25		
2	-0,044	x40		
3	-0,044	x40		

Аналізуючи зображення видно, що при подрібненні мінеральної сировини з використанням гумових футеровок у змиві більша кількість дрібної фракції, що в черговий раз свідчить про вплив гумової футеровки на технологічний процес подрібнення. При оцінці розкриття мінеральних зерен встановлено, що при використанні гумової футеровки підвищується розкриття рудних зерен на 1,8-3 %,

нерудних – на 1,3 %, що в свою чергою збільшує якість кінцевого концентрату на 0,3 %.

Застосування таких футеровок і дозволило створити нову ресурсо- і енергозберігаючу Es-Технологію (Es-technology – Energy Saving Technology) подрібнення руд у кульових млинах. Завдяки цій технології для млина МШЦ 3,6×5,5 першої, другої й третьої стадії подрібнення, залізних руд отримані наступні результати (табл. 2).

Порівняльні показники ефективності роботи футеровок на різних стадіях подрібнення наведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Результати порівняльних випробувань млинів МШЦ 3,6×5,5 першої, другої й третьої стадії подрібнення технологічних секцій РЗФ-1 ПАТ «ПівГЗК» (м. Кривий Ріг, Україна) з різними типами футеровок

Технологічні показники	Стадія подрібнення	Металева футеровка	Гумова футеровка «Плита – Хвиля»	Гумова футеровка «Плита – ліфтер»
Приріст готового класу (- 0,056 мм), %	1	33,6-34,3	36,9-37,3	-
	2	23,8-24,5	28,7-28,9	28,7-28,9
	3	10,7-11,8	17,20	10,7-11,8
Питома витрата електроенергії*, кВт/т руди	1	23,415	20,905	-
	2	5,727	5,349	5,50
	3	6,370	5,890	5,92

Таблиця 3 – Показники ефективності роботи млинів 1, 2, 3-ої стадії

Найменування параметру	Стадія подрібнення	Матеріал футеровки		+/-
		Гумова футеровка	Металева футеровка	
1	2	3	4	5
Витрати електроенергії на переробку 1 т руди, грн/т	1	9,681	10,171	-0,490
	2	3,305	3,538	-0,234
	3	3,639	3,935	-0,296
Витрати вартості футеровки на 1 т руди, грн/т	1	1,898	1,475	0,422
	2	0,089	0,221	-0,132
	3	0,089	0,221	-0,132
Витрати куль на 1 т руди, грн/т	1	6,381	7,458	-1,077
	2	2,784	3,037	-0,253
	3	1,969	2,123	-0,155
Витрати на заміну ліфтерів, грн/т	1	-	-	-
	2	0,041	-	0,041
	3	0,004	-	0,004
Разом, грн/т	1	17,960	19,104	-1,145
	2	6,220	6,797	-0,577
	3	5,666	6,304	-0,638

Так, наприклад, у порівнянні з металевими футеровками, самофутеруюча гумова футеровка «Плита – Хвиля» дозволила: знизити масу комплексу футеровки більш ніж в 3-5 разів і тим самим підвищити термін служби опорних підшипників, знизити експлуатаційні витрати на монтажні-демонтажні роботи із заміни

зношеної футеровки й зменшити ризик нещасних випадків; в 2-3 рази знизити шум; на 3-5 % підвищити коефіцієнт використання млинів (гумова футеровка в порівнянні з металевою має меншу товщину); забезпечити задану продуктивність млина вже з перших годин роботи; знизити витрату мелючих тіл, на 6-10 %; зменшити споживання електроенергії на 7-9 % (у цілому на технологічну секцію на 10-12 %); підвищити термін служби на 80-150 %; підвищити тривалість міжремонтних циклів у два рази; на 3-5 % підвищити коефіцієнт використання млинів: гумова футеровка в порівнянні з металевою має меншу товщину; на 25-30 % скоротити час простоїв млинів для планового й непланового ремонтів; збільшити приріст готового класу продукту (-0,056 мм) на 17-29 % (при використанні металевої футеровки приріст готового класу продукту 10-12 %).

Крім цього:

- при використанні гумової футеровки відсутні підтікання пульпи;
- металева футеровка вимагає частого огляду, підтяжки болтів і ремонту; при використанні гумової футеровки болти не вимагають підтяжки.

Отримані результати добре узгоджуються з даними інших підприємств. Так, наприклад, за даними компанії «Metso Minerals» [2] при подрібненні золотовмісних руд у кульовому млині заміна хромо-молібденової футеровки на гумометалева «Poly-Met» дозволила: підвищити продуктивність млина в основному за рахунок зменшення часу на заміну зношеної футеровки; знизити на 5 % витрати на електроенергію; зменшити витрату куль; знизити витрати на монтажні-демонтажні роботи; зменшити травматизм.

Слід підкреслити, що для кульових млинів витрати на футеровку є тільки малою частиною загальної вартості процесу подрібнення в порівнянні з вартістю середовища, що подрібнюється, і обсягом матеріалу, що переробляється. Тому сьогодні стає вигідним вибрати оптимальну конструкцію гумової футеровки, що забезпечує необхідний приріст готового класу, зниження енергоспоживання й витрату куль, чим робити ставку тільки на вартість футеровки.

Висновки. 1. Для сучасних гірничозбагачувальних комбінатів при зниженні якості корисних копалин і необхідності більш тонкого подрібнення мінеральної сировини (до класу 40 мкм і нижче) досить важливим є підвищення продуктивності відділень подрібнення й зменшення витрат на одиницю продукції, що переробляється. Основні складові цієї проблеми – удосконалення конструкцій млинів і застосування раціональних технологічних схем – досягли деякої межі.

2. Світова практика показала [2, 3, 4], що зниження енергоємності процесу подрібнення й підвищення продуктивності млинів (кульових, самоподрібнення й напіваподрібнення) як по живленню, так і по готовому класу досягається переважно за рахунок використання гумових і гумометалевих футеровок.

3. Застосування нових конструкцій гумових футеровок на всіх стадіях подрібнення дозволяє одержати додатковий резерв по живленню млинів для наступного збільшення обсягів подрібнення в межах 10-15 % у цілому по ГЗК, що суттєво знижує капітальні й експлуатаційні витрати.

4. Уперше у світовій практиці на першій стадії подрібнення міцних залізних руд з кулями діаметром 120 мм застосована гумова футеровка високого профілю

(«Плита Н-Хвиля»); результати випробувань: довговічність до відмови 7-9 тис.год, економія куль до 10 %, електроенергії – до 5-8 %.

5. Нові конструкції гумових футеровок виробництва Валса ГТВ [9, 10] уперше дозволили створити нову ресурсо- і енергозберігаючу Es-Технологію подрібнення мінеральної сировини в кульових млинах.

6. З огляду на результати технологічних і експлуатаційних випробувань гумової футеровки в млинах МШР 3,6×4,0 й МШЦ 3,6×5,5, що працюють зі сталевими кулями діаметром 100 мм та 40 мм, в умовах РЗФ-1 доцільно застосувати в першій, другій, третій стадіях подрібнення гумову футеровку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дырда В.И., Зозуля Р.П. Резиновые футеровки технологических машин. Москва – Днепропетровск, 2013. 237 с.
2. Стюарт М. Джонс, Витас Свалбонас. Крупногабаритные мельницы компании Metso Minerals. *Горная промышленность*. 2004. №6.
3. Развитие систем мельничных футеровок / Klas-Goran Eriksson, Gunder Marklund, А.П. Гребенщиков, В.Ю. Фищев. *Горная промышленность*. 2010. № 1. <https://mining-media.ru/ru/article/drobilka/1623-razvitie-sistem-melnichnykh-futerovok>
4. Олейник Т.А., Хмель И.В. Исследования влияния профиля резиновой футеровки на процесс измельчения в барабанных мельницах. *Вісник Криворізького національного університету*. 2014. № 29.
5. Калганков Є.В. Інноваційна технологія дезінтеграції руди в кульових барабаних млинах першої стадії подрібнення. *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2016: матеріали міжнародної конференції*. Дніпропетровськ, 2016. С. 203-209.
6. Вольфсон С.А. Серьезные сдвиги. О нетрадиционной технологии, окружающей среде и возврате к деревенскому хлебу. Научно-популярный журнал АН СССР «Химия и Жизнь». 1984. №2. С. 16-21.
7. Миндели Э.О. Разрушение горных пород. М.: Недра, 1975. 600 с.
8. Bulat A.F., Dyrda V.I., Kalgankov Ye.V. Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 3. С. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/5>
9. Пат. 105550 Україна, МПК В02С 17/22 (2006.01). Футерівка барабанного млина ; заявник та патентовласник Дирда В.І., Калашніков В.О., Головка Л.Г., Калганков Є.В., Хмель І.В., Стойко О.В., Цаніді І.М. – № u201509188; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.03.2016, бюл. № 6. 4 с.
10. Пат. 78397 Україна, МПК В02С 17/22 (2006.01). Футерівка барабанного млина ; заявник Калашніков В.О., Головка Л.Г., Стойко О.В., патентовласник товариство з обмеженою відповідальністю «Валса ГТВ» – № u201214920; заявл. 26.12.2012; опубл. 11.03.2013, бюл. № 5. 6 с.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I. and Zozulya, R.P. (2013), *Rezinovyie futerovki tekhnologicheskikh mashin* [Rubber linings of technological machines], Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Dzhons, S.M. and Svalbonas, V. (2004), "Large mills by Metso Minerals", *Mining industry*, no.6.
3. Eriksson, K.-G., Marklund, G., Grebeneshnikov, A.P. and Fishchev, V.Yu. (2010), "Mill linings systems development", *Mining industry*, no.1.
4. Oleinyk, T.A. and Khmel, I.V. (2014), "Studies of the influence of the profile of a rubber lining on the grinding process in drum mills", *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, no. 29.
5. Kalhankov, Ye.V. (2016), "Innovation technology of disintegrating ore in cultural drum clays of the first stage stage", *Materialy mizhnarodnoi konferentsii: «Suchasni innovatsiini tekhnolohii pidhotovky inzhenernykh kadriv dlia hirnychoi promyslovosti i transportu 2016»*, pp. 203-209.
6. Volfson, S.A. (1984), "Major shifts. About unconventional technology, the environment and a return to rustic bread", *Nauchno-populiarny zhurnal AN SSSR «Khymiya y Zhyzn»*, no. 2, pp. 16-21.
7. Myndely, E.O. (1975), *Razrusheniye hornykh porod* [Rock destruction], Nedra, Moscow, USSR.
8. Bulat, A.F., Dyrda, V.I. and Kalgankov, Ye.V. (2018), "Synergetic model of the wave abrasive-fatigue wear of rubber lining in the ball-tube mills", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No 3, pp. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/5>
9. Dyrda, V.I., Kalashnikov, V.O., Holovko, L.H., Kalhankov, Ye.V., Khmel, I.V., Stoiko, O.V. and Tsanidi, I.M. (2016), *Futerivka barabannoho mlyna*, Pat. 105550, Ukraine.
10. Kalashnikov, V.O., Holovko, L.H. and Stoiko, O.V. (2013), *Futerivka barabannoho mlyna*, Pat. 78397, Ukraine.

Про автора

Калганков Євген Васильович, магістр, старший викладач кафедри «Надійність та ремонт машин», Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ), м. Дніпро, Україна, kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua

About the author

Kalhankov Yevhen Vasylovych, Master of Science, Senior Lecturer of Department "Reliability and repair of machines", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua

Аннотация. В статье проведены аналитические исследования процесса дезинтеграции минерального сырья в шаровых барабанных мельницах первой, второй и третьей стадий измельчения. Установлено, что процесс измельчения минерального сырья наиболее энергоёмкий и ресурсозатратный. Для улучшения технологических и экономических показателей процессов измельчения в барабанных мельницах используют разные приёмы. Такие как, увеличение объёма мельниц, видоизменение профиля футеровки (конструкции) и применение более износостойчивых материалов, загрузка в мельницы самоизмельчения шаров и др. С целью снижения тонажа помола увеличивают число стадий измельчения, или меняют величину и направление циркулирующих нагрузок. Однако ощутимых эффектов все эти приёмы пока не обеспечивают.

Исследование процесса измельчения указывает, что прочность горной породы на сжатие в 5-10 раз выше границы прочности на сдвиг и в 8-15 раз выше границы прочности на растяжение, при разрушении породы сжатием энергоёмкость в 17,4 раза больше, чем при разрушении сдвигающими или растягивающими напряжениями. Таким образом, наиболее энергосберегающим механизмом разрушения минерального сырья являются способы и средства, в которых реализуются преимущественно сдвиговые напряжения и это возможно реализовать введением в конструкцию мельницы упругих звеньев, заменить металлическую футеровку на резиновую определенной формы. В работе исследовано энергозатраты и разработана концепция их сокращения, так предложено использовать резиновую футеровку с волновой геометрией поверхности. С такой геометрической поверхностью футеровка вступает в гармоничное взаимодействие с загрузкой и в первые часы работы выводит мельницу на заданный режим работы.

Приведено также исследования использования резиновой футеровки, которая в сравнении с металлической даёт возможность: снизить массу комплекта футеровки более чем в 3-5 раз и тем самым повысить срок службы опорных подшипников, снизить эксплуатационные затраты на монтажно-демонтажные работы по замене изношенной футеровки; в 2-3 раза снизить шум; на 3-5 %; обеспечить заданную производительность мельницы уже после первых часов работы; снизить затрату мелющих тел, на 6-10 %; уменьшить потребление электроэнергии на 7-9 % (в целому на технологическую секцию на 10-12 %); повысить срок службы на 80-150 %; повысить продолжительность межремонтных циклов в два раза; на 3-5 % повысить коэффициент использования мельниц; увеличить прирост готового класса продукта (-0,056 мм) на 17-29 %.

Ключевые слова: дезинтеграция, металлическая футеровка, резиновая футеровка, шаровые мельницы, волновое изнашивание, ресурсо- и энергосберегающая технология

Abstract. The article contains analytical studies of the process of disintegration of mineral raw materials in ball drum mills of the first, second and third stages of grinding. It has been established that the process of grinding mineral raw materials is the most energy-intensive and resource-consuming. To improve the technological and economic indicators of grinding processes in drum mills, different techniques are used. Such as increasing the volume of mills, modifying the profile of the lining (structure) and using more wear-resistant materials, loading balls into self-grinding mills, etc. In order to reduce the grinding tonnage, increase the number of grinding stages, or change the size and direction of circulating loads. However, all these methods do not yet provide tangible effects.

The study of the grinding process indicates that the compressive strength of the rock is 5–10 times higher than the shear strength and 8–15 times higher than the tensile strength, when rock is destroyed by compression, the energy intensity is 17, 4 times higher than when shear or tensile stresses. Thus, the most energy-efficient mechanism for the destruction of mineral raw materials is the methods and means in which shear stresses are realized mainly and this can be realized by introducing elastic links into the mill structure, replacing the metal lining with a rubber lining of a certain shape. In the work, energy costs were studied and a concept for their reduction was developed, so it was proposed to use a rubber lining with wave geometry of the surface. With such a geometric surface, the lining enters into harmonious interaction with the load and in the first hours of operation brings the mill to the specified operating mode.

Research is also given on the use of a rubber lining, which, in comparison with a metal lining, makes it possible to: reduce the weight of the lining kit by more than 3-5 times and thereby increase the service life of thrust bearings, reduce the operating costs of installation and dismantling work to replace a worn lining; 2-3 times reduce noise; 3-5 %; ensure the desired performance of the mill after the first hours of operation; reduce the cost of grinding bodies, by 6-10 %; reduce electricity consumption by 7-9 % (as a whole per technological section by 10-12 %); increase the service life by 80-150 %; double the duration of overhaul cycles; 3-5 % increase the utilization of mills; to increase the growth of the finished product class (-0.056 mm) by 17-29 %.

Keywords: disintegration, metal lining, rubber lining, ball mills, wave wear, resource and energy-saving technology

Статья поступила в редакцию 17.02.2020

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.И. Дырдой